

01170
11

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA

Autorizo a la Dirección General de Bibliot.
UNAM a difundir en formato electrónico e imp.
contenido de mi trabajo académico.
NOMBRE: Arturo Morales
Collantes
FECHA: 22/09/03
FIRMA: _____

SOBRETENSIONES EN LOS SISTEMAS
ELECTRICOS.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA ELECTRICA
P R E S E N T A :
ING. ARTURO MORALES COLLANTES

DIRECTOR DE TESIS: DR. VICTOR F. HERMOSILLO WORLEY

MEXICO, D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2003.

A





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1.- SOBRETENSIONES EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS

Descripción de las sobretensiones en los sistemas eléctricos	1
Sobretensiones por descargas atmosféricas	3
Sobretensiones por maniobra de interruptores	8
Sobretensiones temporales	12
Tensiones y Sobretensiones representativas	15
Fallas a tierra	16
Rechazo de carga	17
Resonancia y ferorresonancia	18
Sobretensiones longitudinales	20
Combinaciones de las sobretensiones longitudinales con origen diferente	20
Efecto de las sobretensiones en los apartarrayos	21
Sobretensiones temporales en instalaciones protegida con apartarrayos	22
Sobretensiones de frente lento	22
Sobretensiones debidas a energización y desenergización de líneas	23
Sobretensiones de fase a fase	24
Sobretensiones máximas asumidas	26
Sobretensiones por falla y por liberación de falla	26
Sobretensiones debidas a maniobra de corrientes inductivas y capacitivas	27
Sobretensiones de frente lento por descargas atmosféricas	28

CAPITULO 2.- APARTARRAYOS DE ÓXIDOS METÁLICOS

Constitución	29
Característica voltaje corriente	29
Estabilidad Térmica	33
Características de operación de los apartarrayos de óxidos metálicos	34
Características de protección de los apartarrayos de óxidos metálicos	35
Comportamiento de los apartarrayos de óxidos metálicos ante maniobras de Interruptores	40

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 3.- ESFUERZOS EN LOS APARTARRAYOS DE ÓXIDOS METÁLICOS

Fallas de una fase y dos fases a tierra	47
Cambios repentinos por rechazo de carga	51
Rechazo de carga en unidad generador transformador	54
Capacitancia de líneas en vacío (efecto Ferranti)	55
Resonancia	58
Fenómenos de saturación	59
Circuitos acoplados	60
Corte de pequeñas corriente inductivas	64
Maniobras en circuitos capacitivos	65

CAPITULO 4.- MODELADO DE SOBRETENSIONES EN EL EMTP

Antecedentes	67
CASO1.- Energización de una línea de extra alta tensión(400kV) en vacío	69
Mediante cierres estadísticos y determinísticos, sin apartarrayos y sin resistencias de preinserción, con resistencias de preinserción y con apartarrayos	
Parámetros estadísticos	70
Cierres determinísticos	71
Consideraciones caso1	73
CASO2.- Energización de un transformador de potencia en vacío a través de una línea de transmisión de extra alta tensión (400 kV)	79
Consideraciones del caso 2	79
Caso 3.- Energización de bancos de capacitores en paralelo	83
Energización de bancos de capacitores	87
Desenergización de bancos de capacitores	87
Energización de bancos de dos capacitores interconectados	88
Consideraciones del caso 3	90
Caso 4.- Sobretensión debida a una descarga atmosférica de 500 kV en el reactor de un banco de capacitores	98
Consideraciones del caso 4	99

CAPITULO 5.- SELECCIÓN DE LAS CARÁCTERÍSTICAS DE LOS APARTARRAYOS DE ÓXIDOS METÁLICOS

Selección de la tensión de operación continua (Uc)	103
Tensión residual y capacidad de las sobretensiones temporales	104
Determinación de las sobretensiones temporales debidas a fallas a tierra	105
Distribución de las sobretensiones representativas de frente lento debidas a energización y recierre de líneas	109
Distribución de la probabilidad de la amplitud representativa de la sobretensión esperada de fase a tierra	109

C

TESIS CON
FALLA DE CORTO

Distribución de la probabilidad de la amplitud representativa de la sobretensión esperada de fase a fase	110
Características de aislamiento	113
Protección con apartarrayos de subestaciones	118
Autoprotección de las subestaciones	119
Amplitud de la sobretensión representativa por descargas atmosféricas	121
Penetración de blindaje	121
Flameo inverso	122
Método simplificado	124
Máximo valor asumido de las sobretensiones representativas de rayo	127
Distancias en aire para asegurar una instalación con tensión de aguante de impulso especificada	128
Calculo de la ruptura dieléctrica de claros en aire por datos experimentales	131
Respuesta del aislamiento a las tensiones a la frecuencia del sistema	132
Respuesta del aislamiento a sobretensiones de frente lento	133
Respuesta del aislamiento a sobretensiones de frente rápido	134
Coordinación de aislamiento	136
Cordinación de aislamiento con apartarrayos de óxidos metálicos	138
Determinación de las sobretensiones representativas Urp	138
Determinación de la tensión de aguante de coordinación Ucw	138
Determinación de las tensiones de aguante requeridas Urw	140
Conversión a tensiones de aguante al impulso por maniobra Siv	140
Selección de los niveles de aislamiento normalizados	140

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Las sobretensiones en los sistemas eléctricos de potencia representan uno de los mayores problemas tanto de diseño como de operación, son la causa principal de reducción de la vida de prácticamente todo el equipo que constituye dichos sistemas, así como de la presencia de uno de los más severos eventos durante su operación denominado "disturbio"; que afecta notablemente a la continuidad de servicio, que es uno de los principales parámetros de la calidad del suministro de energía eléctrica.

Las sobretensiones aparecieron casi simultáneamente con el inicio de los incipientes sistemas eléctricos, cuyas líneas entraron en operación comercial a fines del siglo XIX y que rápidamente alcanzaron extensiones de cientos de kilómetros; lo cual propició que las descargas atmosféricas iniciaran sus severos efectos en ellas; afortunadamente a principios del siglo XX también se inventó y desarrolló el osciloscopio de rayos catódicos, que permitió llevar a cabo un estudio sistemático del rayo como descarga atmosférica y primera causa importante de las sobretensiones y sus efectos sobre los sistemas eléctricos.

Alemania, Suecia y Estados Unidos, junto con otros países iniciaron la observación y registro del fenómeno de las descargas atmosféricas, no solo en las líneas de transmisión, sino también en estructuras expuestas al mismo o específicamente construidas para tales fines, ya que se deseaba conocer la forma de onda del rayo, así como medir y registrar su intensidad de corriente.

Más tarde con el desarrollo de los grandes sistemas, la elevación de los voltajes de operación de las redes, originada por el enorme crecimiento de la demanda y la construcción de las grandes estaciones generadoras requeridas para satisfacerla; así como para mejorar los problemas de regulación existentes y la interconexión con otros sistemas, originaron otros tipos de sobretensiones derivadas de las características de operación de los sistemas.

Una de las razones de este tipo de sobretensiones es la conexión o desconexión de los interruptores de los equipos por diferentes causas, demandadas por las condiciones de operación de los sistemas, tales como libramientos de equipos, maniobras de operación, corto circuitos en los equipos, etc., otras más son originadas por las perturbaciones producidas por los cambios de carga, por la

E

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

fluctuación de la demanda, etc., todas estas sobretensiones someten a los aislamientos sólidos, líquidos o gaseosos de los equipos a esfuerzos de ruptura causándoles un deterioro que depende de la magnitud, forma y duración de dichos esfuerzos eléctricos, los fenómenos físicos involucrados en la ruptura del aislamiento son diferentes para los distintos tipos de esfuerzo, por lo que, actualmente las normas internacionales clasifican los esfuerzos típicos encontrados en los sistemas eléctricos de potencia, en varias clases dependiendo de las características de aguante de los aislamientos.

Los graves problemas que representan las sobretensiones en los aislamientos de los sistemas eléctricos, obligan a las empresas eléctricas a llevar a cabo estadísticas de dichos eventos y, por ejemplo, se cuenta con informes de 42 empresas de Estados Unidos y Canadá que analizaron información durante catorce años, encontrando que el 26% de las salidas de las líneas de transmisión de 230 kV y 65 % de las de 345 kV correspondían a descargas atmosféricas[3].

En México, durante el año de 1990, se reportaron en el informe de causas de salidas de servicio de líneas de transmisión de la gerencia de Transmisión y Transformación de la Comisión Federal de Electricidad, 140 fallas de líneas de transmisión de 400 kV, de las cuales las correspondientes a descargas atmosféricas fueron 53.87%; 269 salidas de líneas de transmisión de 230 kV de las cuales las correspondientes a descargas atmosféricas fueron 46.10 % y 765 salidas de líneas de transmisión de 161 y 115 kV de las cuales las correspondientes por descargas atmosféricas fueron 62.58% del total de las salidas por disturbio, como puede observarse para dicha época tanto las salidas de las líneas como los porcentajes correspondientes a salidas por descargas atmosféricas fueron elevadas.

En el año de 1998 se reportaron en porcentaje las estadísticas de salidas de líneas de transmisión durante 1997 y 1998, de las que las correspondientes a descargas atmosféricas para 400 kV fueron 41.82%, a líneas de transmisión de 230 kV fueron 41.41 %, y a líneas de transmisión de 161 y 115 kV fueron 82.63% del total de salidas por disturbio de dichos niveles de tensión respectivamente durante dicho periodo; comparado este con el periodo de 1990 se presenta una variación en los porcentajes de 53.87 % a 41.82% en salidas por descargas atmosféricas en 400 kV, de 46.10% a 41.41% en salidas por descargas atmosféricas en 230 kV y de 62.58% a 82.63% en salidas por descargas atmosféricas en 161 a 115 kV, que muestran una reducción importante de salidas por descargas atmosféricas en 400kV, una reducción modesta en las salidas por descargas atmosféricas en las líneas de 230 kV y un incremento también importante en salidas por descargas atmosféricas en líneas de transmisión de 161-115 kV.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Un segundo tipo de sobretensiones, tan severas o más que las descargas atmosféricas, incluso clasificadas también dentro del grupo de las sobretensiones transitorias, tratadas en el primer capítulo de este trabajo, son las originadas por maniobras de interruptores, sobretodo las que se realizan en niveles de muy alta tensión.

Una de las causas de este tipo de sobretensiones son las salidas de servicio de los interruptores de los equipos de muy alta tensión, que por diversas causas se llevan a cabo en forma cotidiana, derivadas de las condiciones de operación de los sistemas, tales como libramientos de equipo, maniobras de operación, tales como algunas fallas en equipos o instalaciones, etc., de las cuales, por ejemplo en el mismo periodo de 1990, se reportaron salidas de líneas por las causas y maniobras siguientes:

- a) Líneas de transmisión de 400 kV 323 salidas, de las cuales 76% correspondió a libramientos, 13% a maniobras, 8% a falla de equipo, 1% a disturbios.
- b) Líneas de transmisión de 230 kV 522 salidas, de las cuales 64% correspondieron a libramientos, 3% a maniobras, 14% a falla de equipo, 3% a disturbios.
- c) Líneas de transmisión de 161 y 115 kV no se especificó el número de salidas, pero 54% correspondieron a libramientos, 8% a maniobras, 24% a falla de equipo, 16% a disturbios.

Para el periodo de 1998 los resultados fueron los siguientes:

- a) Líneas de transmisión de 400 kV. no se especifica número de salidas, pero 56.61% correspondieron a libramientos y maniobras, 34.26% a mantenimiento, 4.84% a falla de equipo, 0.19% a disturbios.
- b) Líneas de transmisión de 230 kV. no se especifica número de salidas, pero 61.41% correspondieron a libramientos y maniobras, 27.54% a mantenimiento, 5.88% a falla de equipo, 1.07% a disturbios.
- c) Líneas de transmisión de 161 y 115 kV. no se especifica número de salidas, pero 43.06% correspondieron a libramientos y maniobras, 23.68% a mantenimiento, 18.18% a falla de equipo, 3.59% a disturbios.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

G

Los tiempos fuera de los equipos por las anteriores causas reportados en 1990 para fallas, maniobras y libramientos en líneas de transmisión de 400 y 115 kV fueron de 2965 y 18953 hrs. respectivamente, distribuidos de la siguiente forma:

Descargas atmosféricas 30%, estructura 24%, hilo de guarda 11%, viento 10%, contaminación 8%, en 400 kV y libranzas 86%, maniobras, falla de equipo, disturbio 2%, etc., en 115 kV; de los cuales como observamos, los más relevantes corresponden a las principales causas de las sobretensiones.

Considerando, según la publicación Síntesis de Fallas de Líneas de Transmisión de la CFE, para el año de 1998 contábamos en el país aproximadamente con 68,054 kilómetros de líneas de transmisión, de los cuales 12,249.11 correspondían a 400 kV, 20,292.41 a 230 kV, 456.0 a 161 kV, 66.0 a 150 kV y 1,175.79 a 138 kV en tanto que 32,308.46 Km correspondía a la red de subtransmisión en tensiones de 115, y 1506.83 a líneas de 400, 230 y 85 kV. la red de distribución contaba con 277,232 Km en tensiones de 34.5, 23, 13.8, 6.6, 4.16 y 2.4 kV., cerca de 41,891 MVA de subestaciones elevadoras y 72,810 MVA de subestaciones reductoras con un total de 114,701 MVA de transformadores instaladas en las redes de potencia y distribución principales; que los programas de expansión del sector eléctrico estiman a corto plazo un crecimiento importante en este campo, que los problemas de las sobretensiones tienden a mantenerse, considero que es una necesidad fundamental el análisis cuidadoso de este tipo de eventos para poder atenuarlos en forma efectiva.

Otro tipo de sobretensiones que se presentan en los sistemas eléctricos, tratadas en el primer capítulo, son las conocidas como sobretensiones de baja frecuencia, entre las cuales tenemos las temporales originadas por maniobras de interruptores de menores niveles de tensión, rechazos de carga, fluctuación de la demanda, fenómenos de resonancia, ferorresonancia, etc., y las sobretensiones de operación continua producidas por los cambios entre la demanda y la generación debidas a las características de operación de los mismos, y aunque no necesariamente provocan interrupciones directamente como las anteriores, influyen considerablemente en las causas de interrupción por otros eventos, pero lo que es más importante, someten a los aislamientos de los equipos del sistema permanentemente a esfuerzos.

Es muy probable que los efectos producidos por este tipo de sobretensiones sean despreciados debido a que su intensidad es relativamente baja, sin embargo el hecho que sus tiempos de duración sean comparativamente mas altos que los de los otros tipos de sobretensiones, cuando se presentan someten a los equipos a esfuerzos casi equivalentes en términos de energía.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

H

Hasta los años recientes los requerimientos de aislamiento aplicados a los diseños de los sistemas eléctricos, habían sido basados en criterios de descargas atmosféricas, el dimensionamiento de las estaciones, subestaciones y líneas eléctricas, el tamaño de las mufas terminales, el número de aisladores de las cadenas, los claros de las torres y estructuras, así como las pruebas de aislamiento de los equipos se llevaban a cabo sólo con criterios de tensiones de forma de onda de las descargas de impulso por rayo; actualmente con las altas tensiones de operación de los modernos sistemas, los transitorios durante las maniobras de interruptores o cierre y apertura de los disyuntores de circuitos de enlace tienen mayor relevancia, sobretodo para sistemas con tensiones de operación superiores a 230 kV [3].

Contenido

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, el desarrollo de este trabajo consistió en el análisis y descripción de los diferentes tipos de sobretensiones que se presentan en los sistemas eléctricos: transitorias, temporales y de baja frecuencia, según los estándares IEC 71-1/2, las cuales se tratan en el primer capítulo de este documento; en el cual se describen las sobretensiones de los sistemas eléctricos según sus características, origen y evolución, tomando como referencia las especificaciones de IEC que las clasifica como transitorias y de baja frecuencia, y en una subdivisión más las describe como sobretensiones transitorias de frente lento, rápido y ultrarápido, así como las de baja frecuencia en donde se describen y clasifican en sobretensiones temporales y de operación continua; haciendo una más detallada agrupación de estos tipos de sobretensiones de las que se describen las características fundamentales y sus efectos en los sistemas eléctricos.

Se describen las formas de onda normalizadas para sobretensiones por descargas atmosféricas y por maniobra de interruptores así como la mecánica de la descarga; se define el concepto de nivel cerámico o de isodensidad de descargas a tierra, y se analizan las sobretensiones transitorias por maniobra de interruptores, descargas atmosféricas de frente lento y las tensiones temporales por fallas a tierra, rechazo de carga, resonancia y ferrorresonancia.

Se tratan los conceptos de tensiones y sobretensiones representativas, la tensión máxima del sistema U_s , tensión máxima del equipo U_m , etc., se describen los efectos de las sobretensiones en los sistemas eléctricos y sus elementos de atenuación, representándolos mediante su circuito equivalente; se describe el efecto de las sobretensiones temporales de frente lento, de energización y reenergización de líneas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Se analiza el diagrama de distribución de probabilidad de amplitud de las sobretensiones desarrollado por el grupo de estudio 37 de CIGRE, del cual se pueden obtener con muy buena aproximación los valores de sobretensión 2% de fase a fase en función de las sobretensiones de fase a tierra.

En el segundo capítulo se describen los apartarrayos de óxidos metálicos como el elemento de protección contra sobretensiones más difundido en los sistemas eléctricos y se describen sus características constructivas y de operación.

Se analiza la característica de voltaje-corriente para las diferentes regiones de operación del apartarrayo de óxidos metálicos, regiones de campo eléctrico bajo, medio y alto; se analizan las características de operación y de protección y su influencia con la temperatura de operación, lugar de instalación y condiciones del medio ambiente; se analizan los efectos de estabilidad térmica y degradación de dichos apartarrayos: química, por sobretemperatura, por esfuerzos de corriente y por envejecimiento de los materiales componentes.

Se analiza el fenómeno de conducción de los apartarrayos de óxidos metálicos estudiado por el grupo de trabajo 33 de CIGRE en un congreso de Tokio en la década pasada, en donde se describió el desarrollo de la característica tensión-tiempo de una sobretensión, mostrando las características de todos los parámetros, analizando su comportamiento ante descargas atmosféricas y maniobras de interruptor.

Se ejemplifica el efecto de las condiciones del medio en la operación de los apartarrayos de óxidos metálicos ante los efectos de la temperatura de operación, el lugar de instalación y las condiciones del medio ambiente, y analizan las características de protección de dichos apartarrayos.

Se analiza la característica de protección de los apartarrayos de óxidos metálicos en la curva voltaje-corriente, destacando el tiempo de retraso para cambio en el mecanismo de conducción, desde el efecto térmico hasta el efecto túnel, definiendo el tiempo cero, el tiempo caracterizado por la presencia del voltaje pico inicial, el tiempo correspondiente al voltaje residual al cual la corriente del apartarrayos inicia su descarga.

Se presenta la característica voltaje-corriente de un block varistor de óxidos de metal y la representación del circuito equivalente de un apartarrayos de óxidos de metal completo simplificado y la representación matemática del efecto del elemento de giro desarrollada y presentada por investigadores de la URSS en la década de

los 70s; se presenta el comportamiento de los apartarrayos de óxidos de metal ante maniobras de interruptores,

En el tercer capítulo se analizan los tipos de esfuerzo producidos por las sobretensiones en los apartarrayos de óxidos metálicos, entre las cuales se distinguen las sobretensiones por energización o rechazo de carga, corto circuito monofásico y trifásico a tierra, resonancia y ferorresonancia; en fallas, se analizan las de una y dos fases a tierra, se analizan sus efectos para diferentes configuraciones de los sistemas y diferentes tipos de aterrizamientos, describiendo los procedimientos de solución para cada uno de los casos; se analizan condiciones para sistemas con neutro aislado y resonante.

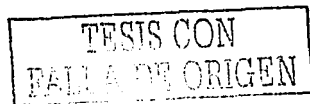
De la misma forma se tratan los efectos de los cambios repentinos por rechazo de carga, las curvas características para determinación de los factores de aterrizamiento y de sobretensión K1-QL/SL y K1-PI/ScC particularizando el rechazo de carga en unidades generador-transformador ; otro caso analizado es el efecto Ferranti debido a maniobras de líneas de transmisión largas, en vacío, sus efectos, atenuación, control y análisis para diferentes configuraciones y dimensiones de sistemas en función de su nivel de corto circuito; de la misma manera se trataron los casos de resonancia y ferorresonancia

El capítulo 4 trata el modelado de las sobretensiones, en el que se describe la evolución de la tecnología aplicada al análisis de los fenómenos transitorios por sobretensiones de los sistemas eléctricos, desde el uso de los sistemas analógicos durante la décadas de 1940 y fines de 1950 en las que surgieron los primeros analizadores de redes en los cuales se configuraba la topología del sistema mediante el armado de la red para cada condición de carga y generación, hasta los actuales analizadores digitales como el EMTP y su nueva alternativa el ATP en sus recientes versiones.

Para desarrollar este tema se eligieron los cuatro casos de análisis de sobretensiones siguientes:

1.- Energización de una línea de muy alta tensión (400kV), 271 Km en vacío, la cual se modeló para diferentes condiciones de operación: considerando inicialmente que la línea no cuenta con apartarrayos en sus extremos, que los interruptores seccionadores ubicados en ambos extremos de la línea son convencionales, es decir no cuentan con resistencias de preinserción y son del mismo tipo; posteriormente se incluyen las resistencias de preinserción en los interruptores de la línea como una segunda alternativa de energización, comparando el comportamiento de la sobretensión durante la maniobra para ambas condiciones; una tercera alternativa se realizó retirando las resistencias de preinserción de los

K



interruptores e instalando apartarrayos de óxidos metálicos en los extremos de la línea.

Los resultados de las tres alternativas anteriores permiten llevar a cabo elecciones más fundamentadas tanto técnica como económicamente

2.- Energización de la misma línea de 400 kV, 271 Km, con un transformador conectado en las barras del extremo receptor de la línea como una cuarta alternativa adicional a las anteriores, que de ser posible permite una compensación más natural durante la maniobra que favorece la operación, prácticamente sin inversión.

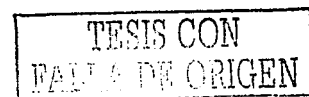
En todos los casos se obtuvieron resultados gráficos del comportamiento de la tensión para cada una de las diferentes condiciones planteadas, las cuales nos muestran una valiosa información que permitirá obtener diversas alternativas de solución para el control de las sobretensiones; de igual manera se analizó el caso de la misma línea de transmisión de 400 kV en cuyo extremo receptor se ubica un transformador de potencia conectado a las mismas barras que la línea, considerando que el transformador no tiene carga conectada; este análisis se realizó como una variante adicional del primer caso para controlar la sobretensión por energización de una línea de transmisión larga.

3.- Adicionalmente se simuló la energización mediante maniobra de interruptor de bancos de capacitores de una subestación de distribución 230/13.2 kV, considerando la alternativa de contar con dos bancos conectados en paralelo a las mismas barras de distribución (media tensión del transformador), y simulando la conexión de los interruptores de los bancos tanto independientemente, como uno a continuación del otro alternativamente, ya que se consideraron bancos de diferente capacidad; de esta manera se obtuvo información de las sobretensiones originadas por dichas combinaciones de maniobras, con objeto de elegir las más representativas en cada caso; adicionalmente se planteo una alternativa más, que consistió en la introducción de una reactancia seccionando las barras entre los dos bancos de capacitores, con lo cual se obtuvo una mayor atenuación para todas las alternativas, lo que demostró que de esta manera, con una mínima inversión se puede atenuar convenientemente la sobretensión por dicha maniobra.

4.- El cuarto caso de simulación analizado consistió en el de una sobretensión originada por una descarga atmosférica de 550 kV, sobre el reactor del neutro de un banco de capacitores instalado en las barras de media tensión del transformador de una subestación de distribución.

Finalmente en el capítulo 5 que trata la parte complementaria de la selección de las características de los apartarrayos de óxidos metálicos y la coordinación de

L



aislamiento de los sistemas eléctricos, se definen los conceptos de tensión de operación continua U_c , tensión residual U_r y capacidad de manejo de energía de los apartarrayos; se analizan los conceptos de tensiones y sobretensiones representativas, tensiones de aguante de coordinación, tensiones de aguante requeridas, tensiones de aguante normalizadas de impulso por maniobra y descarga atmosférica, indispensables para la selección de apartarrayos de óxidos de metal y para la coordinación de aislamiento

Se describe el procedimiento para estimar la distribución de probabilidad de la amplitud representativa de la sobretensión esperada de fase a tierra y fase a fase en función de las sobretensiones 2% fase a tierra, empleando los métodos fase-pico o pico-envolvente en el primer caso y mediante el análisis de la característica de aislamiento en el segundo, para la evaluación de la sobretensión trifásica, con objeto de determinar el instante más crítico de la forma de la sobretensión; cuya característica de probabilidad resulta de doble variable, dando como resultado curvas de forma elíptica si se utilizan distribuciones de Gauss o circular cuando se emplean distribuciones de Weibull.

Se analiza la característica de aislamiento de una probabilidad de descarga de 50% y su comportamiento para descargas entre terminales, positiva y negativa a tierra.

Los resultados anteriores pueden variar dependiendo de las configuraciones de los electrodos y las partes de la configuración donde se presentan las sobretensiones, las cuales dependen de las formas de la configuración misma, de las características de homogeneidad del campo eléctrico en el medio, etc., los nuevos valores de la sobretensión representativa fase a fase U_{p2r} , una nueva desviación y el valor de truncación.

Se analiza el comportamiento de las sobretensiones por descargas atmosféricas en subestaciones, la frecuencia, la amplitud y la pendiente con las que las ondas de sobretensión inciden, la ubicación entre los apartarrayos y los equipos protegidos.

Las características de autoprotección de las subestaciones, la amplitud de las sobretensiones representativas por descargas atmosféricas, los conceptos la penetración de blindaje, del flameo inverso, etc.

Se presenta un nuevo procedimiento de coordinación de aislamiento propuesto por IEC, consistente en la determinación de los esfuerzos de tensión de cualquier origen en el equipo, y la correspondiente rigidez dieléctrica requerida, basada en los márgenes aceptables de protección o los niveles aceptables de comportamiento; se concluye con un ejemplo de coordinación de aislamiento de la

W

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

zona de 23 kV de una subestación de distribución ubicada a una altura de 2300 msnm en una zona con índice de contaminación alto, aplicando el criterio recomendado por IEC.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Objetivo

El objetivo de este trabajo consiste en dar a conocer la información existente de las sobretensiones en los sistemas eléctricos, su origen, evolución y clasificación, describir los principales tipos de sobretensiones y su subdivisión, las causas que las producen y las medidas para atenuarlas, los efectos que estas producen a los aislamientos de los sistemas eléctricos de potencia y las consecuencias en el suministro eléctrico.

Describir los apartarrayos como elementos de atenuación y protección contra las sobretensiones, su evolución, desarrollo y aplicaciones actuales, su composición y construcción, sus características de operación, protección y los criterios de selección de los mismos.

Analizar los esfuerzos a que dichos apartarrayos son sometidos por los diferentes tipos de sobretensiones, su relación con los esfuerzos en los aislamientos y el establecimiento de los factores de sobretensión.

Mostrar cómo el uso de la computadora digital hace posible la simulación y el análisis de casos que por su complejidad no se pueden llevar a cabo con las herramientas tradicionales.

Mostrar cómo mediante la simulación de los fenómenos transitorios es posible tomar decisiones más acertadas, y que contar con información de múltiples corridas garantizará una mayor precisión de los resultados.

Demostrar que la coordinación de aislamiento es una magnífica herramienta para armonizar los efectos de las sobretensiones producidas por los fenómenos transitorios, los esfuerzos a que son sometidos los aislamientos y los medios para contrarrestarlos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 1.- SOBRETENSIONES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Las sobretensiones a que se ven sometidos los sistemas eléctricos son fenómenos cotidianos de las condiciones de operación de dichos sistemas y de los efectos de las condiciones atmosféricas dominantes en las zonas de influencia de los mismos.

Una sobretensión es cualquier voltaje entre fases o entre fase y tierra, cuyo valor de cresta sea mayor que el valor de cresta del voltaje máximo de operación entre fases o de fase a tierra del sistema respectivamente, es decir $V_m \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3}$ entre fase y tierra o $V_m \cdot \sqrt{2}$ entre fases.

Las sobretensiones se expresan en por unidad utilizando el voltaje entre fases máximo del sistema V_m como base, por ejemplo, una sobretensión entre fase y tierra con valor máximo V_f en por unidad es:

$$p_u = \frac{V_f \cdot \sqrt{3}}{V_m \cdot \sqrt{2}}$$

Todas las sobretensiones someten a los aislamientos sólidos, líquidos o gaseosos de los equipos a esfuerzos de ruptura causándoles un deterioro que depende de la magnitud, forma y duración de dichos esfuerzos eléctricos, los fenómenos físicos involucrados en la ruptura del aislamiento son diferentes para los distintos tipos de esfuerzo, por lo que, actualmente las normas internacionales clasifican los esfuerzos típicos encontrados en los sistemas eléctricos de potencia, en varias clases dependiendo de las características de aguante de los aislamientos [3].

IEC clasifica las sobretensiones de los sistemas eléctricos de acuerdo con la tabla 1.1 de la norma IEC 71-1 en dos grupos: transitorias y de baja frecuencia; dividiendo a las sobretensiones transitorias en los tres subgrupos siguientes:

- de frente lento,
- de frente rápido y
- de frente muy rápido

dependiendo de la duración de sus tiempos de frente de la onda

A las sobretensiones de baja frecuencia se les subdivide en los dos subgrupos siguientes:

- sobretensiones de operación continua
- sobretensiones temporales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

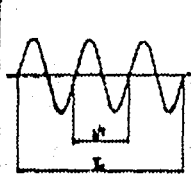
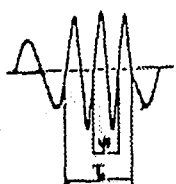
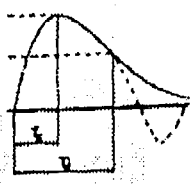
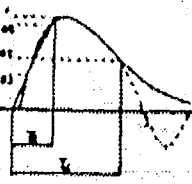
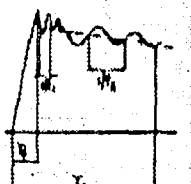
CLASS	LOW FREQUENCY		TRANSIENT		
	CONTINUOUS	TEMPORARY	SLOW-FRONT	FAST-FRONT	VERY-FAST-FRONT
voltage shape					
range of voltage shapes	$f = 50$ or 60 Hz $T_d \approx 1$ hr	$50 < f < 500$ Hz $0.03 < T_d < 3600$ s	$30 < T_f < 3000$ μ s $0.3 < T_d < 30$ ms	$0.3 < T_f < 30$ μ s $3 < T_d < 300$ μ s	$3 < T_f < 300$ ns $0.3 < f_1 < 100$ kHz $30 < f_2 < 300$ kHz $0.03 < T_d < 3$ ns
standard voltage shape	$f = 50$ or 60 Hz $T_d = (*)$	$60 \leq f \leq 62$ Hz $T_d = 1$ min	$T_f = 250$ μ s $T_d = 2300$ μ s	$T_f = 1.2$ μ s $T_d = 50$ μ s	under consideration
standard withstand test	long-duration power-frequency test	short-duration power-frequency test	switching impulse test	lightning impulse test	(chopped impulse) under consideration

Figura 1. Clasificación de esfuerzos eléctricos y sobretensiones de acuerdo a la norma IEC-71.

Sobretensiones transitorias por descargas atmosféricas

Las sobretensiones aparecieron casi simultáneamente con el inicio de los incipientes sistemas de potencia, cuyas líneas entraron en operación comercial a fines del siglo XIX y rápidamente alcanzaron extensiones de cientos de kilómetros; lo cual propició que las descargas atmosféricas iniciaran sus severos efectos sobre ellas; afortunadamente a principios del siglo XX también se inventó y desarrolló el osciloscopio de rayos catódicos, que permitió llevar a cabo un estudio sistemático del rayo como descarga atmosférica y causa importante de las sobretensiones y sus efectos sobre los sistemas eléctricos.

Alemania, Suecia y Estados Unidos, junto con otros países iniciaron la observación y registro del fenómeno, no solo en las líneas de transmisión, sino también en estructuras expuestas al mismo o específicamente construidas para tales fines, ya que se deseaba conocer la forma de onda del rayo, así como medir y registrar su intensidad de corriente.

Las sobretensiones por descargas atmosféricas o rayos son de tipo natural, ya que su origen no tiene una relación directa con el sistema eléctrico, se presentan en forma de ondas y son causadas por diferencias de potencial entre las nubes y tierra, que producen la ruptura dieléctrica cuando se rebasa la rigidez dieléctrica del aire, y dependen de factores tales como la distancia entre nubes y tierra, las condiciones climatológicas y la naturaleza del terreno.

La forma de onda de las sobretensiones normalizadas son de $1.2/50 \mu s$ y corresponde a una onda con tiempo de frente de $1.2 \mu s$ y tiempo de cola de $50 \mu s$, su representación se lleva a cabo mediante una expresión de gran versatilidad que reúne los requerimientos de una forma de onda práctica, empleando la combinación de dos ondas exponenciales: $E\varepsilon^{-at}$ y $-E\varepsilon^{-bt}$ [29] siguiente:

$$e = E(\varepsilon^{-at} - \varepsilon^{-bt}) \quad (1)$$

en que E, a y b son constantes arbitrarias, la fig. 1.1 muestra dichas ondas.

Los tres parámetros a, b y E son suficientes para determinar únicamente la longitud de la cresta y el frente de la onda.

La cresta de la onda o amplitud máxima se presenta cuando la pendiente de la tensión con respecto al tiempo vale cero, es decir:

$$\frac{de}{dt} = E(-a\varepsilon^{-at} + b\varepsilon^{-bt}) = 0$$

por lo tanto a un valor de t para el cual:

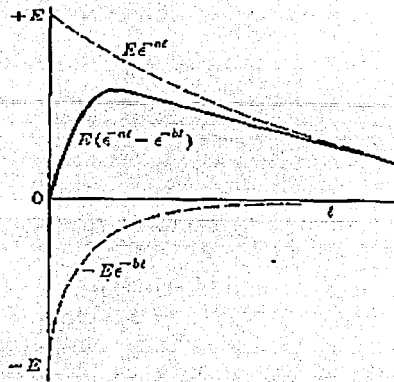


Fig. 1.1 Onda representativa de sobretensión por descarga atmosférica R [29] Bewley

$$t = t_1 = \frac{\log(b/a)}{b-a} = \frac{1}{a} \frac{\log(b/a)}{(b/a)-1} = \frac{B}{a} \quad (2)$$

por lo que el voltaje de cresta es:

$$E_1 = E(a\epsilon^{-at_1} - b\epsilon^{-bt_1}) = E(\epsilon^{-B} - \epsilon^{-Bb/a}) \quad (3)$$

el tiempo t_2 en el cual la onda decrece al 50% de valor de cresta en la cola de la onda es dado por:

$$\frac{E_1}{2} = E(a\epsilon^{-at_2} - b\epsilon^{-bt_2}) = E(\epsilon^{-B(t_2/t_1)} - \epsilon^{-(b/a)B(t_2/t_1)}) \quad (4)$$

sustituyendo la ecuación (3) en la (4) tenemos:

$$\frac{1}{2} (\epsilon^{-B} - \epsilon^{-B(b/a)}) = \epsilon^{-B(t_2/t_1)} - \epsilon^{-(b/a)B(t_2/t_1)} \quad (5)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Ecuación que muestra que corresponde a un valor definido de t_2/t_1 para un valor asignado de b/a , pero es necesario obtener t_2/t_1 por graficación o cualquier otro método de aproximación.

La figura 1.2 muestra la determinación gráfica de las ondas y sus componentes, entre las cuales algunas de sus funciones son:

at_1 como una función de b/a de la ecuación (2)

E_1/E como una función de b/a de la ecuación(3)

t_2/t_1 como una función de b/a de la ecuación (5)

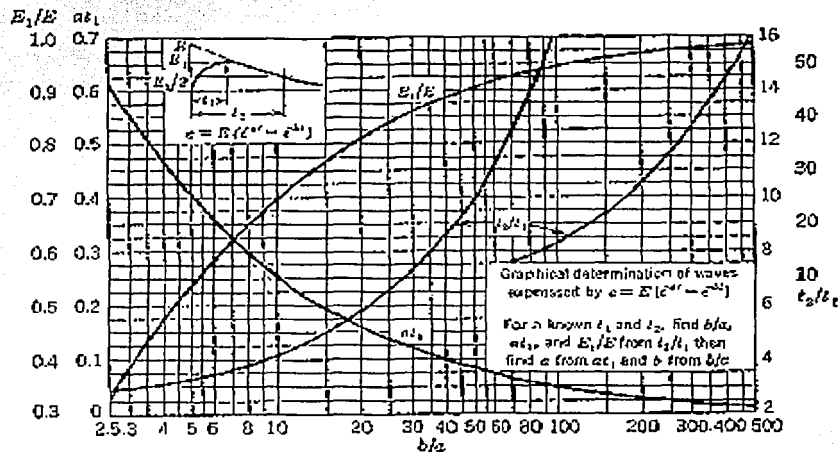


Fig. 1.2 Especificación de una onda producida por descarga atmosférica R [29] Bewley

Las descargas directas por rayo producen corrientes con valores de cresta que van desde algunos cientos hasta 200,000 amperes, con tiempos de frente de las ondas que van desde una fracción de microsegundo hasta varios microsegundos.

Las descargas por rayo se registran en forma más común como descargas simples aún cuando se tienen registros de descargas múltiples, estas descargas por lo general terminan en forma repetida en el mismo punto, como la descarga original pueden ocurrir en grupos de descargas, que se pueden extender en el tiempo por varios microsegundos; según registros estadísticos aproximadamente la mitad son del tipo múltiple entre 2 y 42 descargas en espacios de tiempo de .1 a .5 segundos y en forma aproximada, del orden del 15% tienen hasta 6 componentes.

Las descargas atmosféricas son la causa del mayor número de disturbios y daños en los sistemas de alta tensión, produciendo el mayor número de interrupciones de servicio, y en ocasiones, hasta la destrucción de algunos elementos de los sistemas, especialmente las líneas de transmisión, esto origina costos importantes a las empresas eléctricas y molestias a los usuarios; el estudio de estos fenómenos permite considerar, desde la etapa de proyecto, la adopción de los criterios de diseño adecuados, para incorporar índices de calidad elevados en el suministro de la energía eléctrica [22].

El análisis del comportamiento de las líneas de transmisión bajo la acción de las descargas atmosféricas, se basa en la determinación del índice de salidas o de indisponibilidad de las líneas de transmisión, que se determina en base a procedimientos estadísticos y se expresa como el No. de salidas/ 100 km-año para cada línea de transmisión.

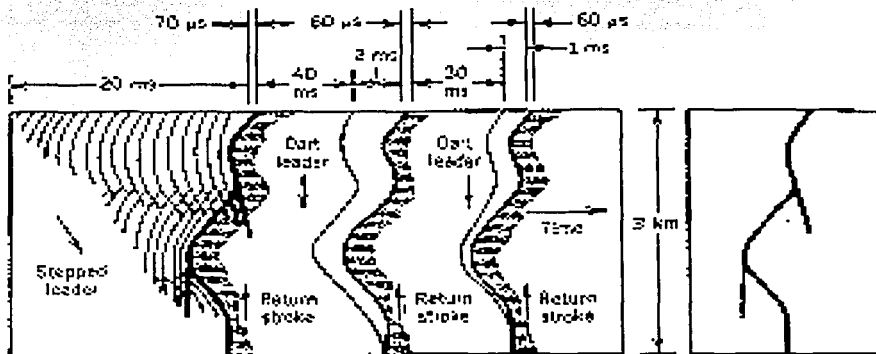


Fig. 1.3 Forma desarrollada del mecanismo de las descargas atmosféricas Referencia [3] Greenwood

Los cables de guarda de las estructuras de las líneas de transmisión, tienen la función de evitar que se presenten descargas directas sobre los conductores activos, proporcionando lo que se conoce como el blindaje aún cuando por alguna razón este blindaje falla, es decir, permite que los rayos violen su zona de protección e incidan sobre los conductores de fase, lo que constituye una falla; si la descarga se presenta en un punto con bajo nivel cerámico y la sobretensión no se incrementa sensiblemente, el voltaje que se manifiesta en la línea no excede a la tensión resistente del aislamiento y no se presenta el flameo o arco eléctrico, cuando el valor de la corriente resulta elevado, el voltaje excederá a la tensión resistente del aislamiento y se presentará el flameo, desde luego que si un impulso de rayo produce una falla de blindaje, por ejemplo a un claro de la subestación, es posible que se tenga una magnitud de corriente mayor que entre a la subestación, por lo que el blindaje de la línea de transmisión se debe diseñar para obtener una mejor protección contra las descargas atmosféricas [19].

Es posible que se presenten descargas directas a los conductores activos de las subestaciones eléctricas, una descarga por rayo a los cables de guarda de la subestación, se conduce a tierra a través de la red de tierras.

La posibilidad de una salida o interrupción de servicio depende de muchos factores, la mayoría de los cuales son de naturaleza estadística.

El número de descargas que hacen contacto con una torre o con los cables de guarda de una línea a lo largo del claro, depende del "nivel cerámico" o del número de días/año con tormenta que exista para una región determinada; estudios realizados en varios países del mundo en los que se han llevado a cabo estos trabajos, permite estimar que el número de descargas que ocurren en un kilómetro cuadrado por año en cualquier localidad ó área geográfica, se puede expresar por la fórmula:

$$ND = \text{Descargas a tierra} / \text{km}^2 - \text{año}$$

En donde $(ND = .12 a .20) * DT$; siendo DT el número total de descargas a tierra

Asimismo se considera experimentalmente que el área interceptada por una línea de transmisión, con estructuras metálicas es proporcional a:

a) La altura de la torre (ht) más dos veces la altura del cable de guarda (hg) a la mitad del claro

$$ht + 2hg$$

b) La distancia entre los cables de guarda (cuando hay más de uno) en la torre. (sg).

Combinando estos factores, se estima que el número de descargas interceptadas por 100 km. de línea por año está dada por:

$$ND = (.12 a .20) * DT * [.0133(ht + 2hg) + 1Sg]$$

en donde ht, hg y sg se expresan en metros [43].

Se puede observar que con dos cables de guarda el número de descargas a la línea, es casi el doble de cuando se usa un cable de guarda.

Por otro lado se debe tomar en cuenta que las descargas atmosféricas en las líneas de transmisión, también pueden inducir un flameo inverso que se presenta cuando el rayo incide sobre una torre; la magnitud de la diferencia de potencial entre torre y conductores, está determinada por la magnitud de la corriente, la impedancia característica de aterrizamiento al pie de la torre, y la resistividad del terreno.

Si la diferencia de potencial entre la torre y la línea de transmisión excede al voltaje resistente de la cadena de aisladores, se producirá un flameo inverso, apareciendo una onda de impulso en el conductor de fase correspondiente; esta onda se propagará hacia ambos lados de la línea, atenuándose en la propia impedancia de la línea. [3], [8], [19], [22], [24], [43].

Sobretensiones transitorias por maniobra de interruptores

Las sobretensiones debidas a la liberación de las energías electromagnética y electrostática por maniobra de interruptores en los sistemas de alta tensión, pueden causar daños al aislamiento del equipo; bajo ciertas circunstancias, estas sobretensiones pueden ser más severas aún que las debidas a descargas atmosféricas [3].

En los sistemas eléctricos, las corrientes de corto circuito se presentan por distintas causas primarias, entre las que se encuentran desde luego, las fallas de aislamiento por sobretensiones de origen atmosférico (rayo), por fallas debidas al envejecimiento del aislamiento, por temperaturas de operación excesivas, etc.; el problema de cálculo de estas corrientes aplicando el método de las componentes simétricas con base en técnicas digitales, es una forma de solución ampliamente utilizada en textos y programas de cálculo en estaciones de trabajo y computadoras personales.

La interrupción de las corrientes de corto circuito produce algunos tipos de sobretensiones que se estudian como parte del grupo de las llamadas sobretensiones por "maniobra" de interruptores, entendiéndose por maniobra la operación de conexión o desconexión de interruptores en la red.

Las sobretensiones por maniobra ocurren con frecuencia durante la operación normal de un sistema, por ejemplo, durante la apertura o cierre de los interruptores, las ondas de sobretensión más significativas, desde el punto de vista de severidad y de probabilidad de ocurrencia, son las debidas a la energización y al recierre a gran velocidad de líneas de transmisión, cables de potencia y bancos de capacitores.

Adicionalmente se pueden esperar sobretensiones, debidas al corte de las ondas de voltaje o corriente por cierto tipo de interruptores durante la desconexión de reactores, bancos de capacitores o transformadores, de hecho desde el punto de vista de la coordinación de aislamiento en los sistemas de alta y extra alta tensión, la selección del apartarrayos se basa fundamentalmente en las ondas de energización y recierre.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las ondas producidas por maniobra de interruptores en alta tensión son de característica transitoria rápidamente decreciente y de naturaleza altamente oscilatoria, las ondas de energización y recierre son básicamente similares, con la diferencia que al efectuar un recierre de alta velocidad en una línea de transmisión, queda atrapada una cierta carga en la línea durante el período de desenergización si se tiene conectada a la línea compensación reactiva en derivación, la carga atrapada oscilará a una frecuencia cuyo valor depende del valor de la capacitancia de la línea y de la inductancia del reactor en derivación.

La presencia de esta carga atrapada hace que los transitorios de recierre sean más severos que los resultantes de la energización de la línea muerta, si se tienen conectados a la línea transformadores de potencia, o transformadores de potencial, la saturación de los núcleos de los transformadores provocará que la carga atrapada sea drenada de la línea durante el período de desenergización [16].

Las maniobras de interruptores que se consideran relevantes para el estudio de las sobretensiones en los sistemas eléctricos de alta tensión son:

- a) Energización de líneas, cables, transformadores, reactores, capacitores y barras.
- b) Reenergización o recierre de líneas a alta velocidad.
- c) Tensiones de recuperación por recierre de líneas de transmisión o cables.

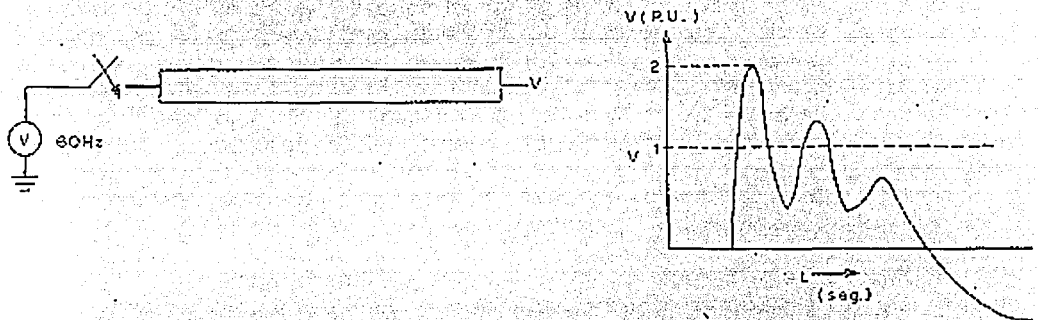


Fig. 1.4.- Fenómeno de sobretensión por maniobra de interruptor, Referencia [24].

Un transitorio de energización resulta de la conexión de una línea, cable, transformador, reactor en derivación o barra a un sistema energizado por el cierre de un interruptor, en este caso, el equipo que está siendo energizado ha sido desconectado por algún tiempo, por lo que no hay voltaje inicial o corrientes en el equipo; cuando las condiciones iniciales son cero en magnitud, se dice que el circuito está estático, en un circuito monofásico el cierre del interruptor produce un voltaje igual a dos veces el voltaje de la fuente.

En los sistemas trifásicos, es típico que por el acoplamiento entre las fases resulten ondas de sobretensión de mayor magnitud que las encontradas para los circuitos monofásicos, encontrándose valores del orden de 2.5 a 3.0 p.u.

En algunos circuitos se pueden usar resistencias de supresión de ondas en el cierre de los contactos de los interruptores, las cuales se conocen también como resistencias de preinserción y reducen la magnitud de las ondas de energización al nivel de 1.5 a 2.5 p.u [3].

El transitorio por recierre resulta de la reenergización a alta velocidad de una línea de transmisión, un transformador, un cable o un juego de barras, en donde cualquiera de estos elementos estaba previamente energizado; esta reenergización sigue a un tiempo muerto de 15 a 30 ciclos.

Una línea de transmisión que se energiza con una fuente que genera voltajes de 60 Hz, resulta con una carga atrapada o voltaje que es aproximadamente igual al voltaje en la fuente; debido a la carga que reside por la capacitancia de la línea.

Durante el recierre de la línea puede resultar un transitorio largo si la fuente de voltaje y el voltaje debido a la carga atrapada son iguales en polaridad y magnitud; en un circuito monofásico el transitorio resultante de un recierre, puede alcanzar un voltaje hasta de 3.0 p.u; en el caso de energización el acoplamiento entre fases en un circuito trifásico puede resultar en niveles de ondas mayores, en forma típica, los transitorios de maniobra de recierre en los sistemas de potencia, se encuentran entre 2.5 y 3.5 p.u. pudiendo llegar hasta 4.0 p.u.; estos valores se reducen a valores entre 1.2 y 2.5 p.u mediante el uso de resistencias de preinserción en los interruptores de los sistemas en alta tensión.

Las ondas de recierre se pueden reducir si se usan reactores desconectables en derivación para compensar la línea, estos reactores podrán influir en el transitorio en el caso de una operación de recierre, la carga atrapada producirá durante el tiempo muerto un voltaje oscilatorio que se abatirá en la línea; la frecuencia fundamental de oscilación será función de la configuración de la línea, su longitud y la capacidad de los reactores en derivación [24].

El recierre de una combinación línea de transmisión-transformador, por lo general produce una onda igual a aquella resultante de la energización, debido a que la carga atrapada decae a cero dentro del lapso de tiempo muerto; la capacitancia de la línea y la reactancia de magnetización no lineal del reactor, forman un circuito oscilatorio no lineal de un alto volumen de pérdidas que disipa la energía en un lapso de alrededor de 15 ciclos, en cuyo caso el transitorio de

sobretensión por recierre, es normalmente del mismo orden de magnitud que las sobretensiones por energización.

Las sobretensiones de restablecimiento resultan a través de los contactos del interruptor, durante la apertura; los interruptores de potencia se deben diseñar con un valor normalizado o específico del índice de elevación de la tensión transitoria de restablecimiento, así como la magnitud de esta tensión

Si el voltaje de recuperación o restablecimiento es mayor que la rigidez dieléctrica del medio entre los contactos del interruptor se presentarán problemas de reencendido o reignición del arco; si esto ocurre en forma repetida el voltaje transitorio del sistema puede ser excesivo y hacer fallar el aislamiento del propio interruptor o de otros equipos asociados a la instalación.

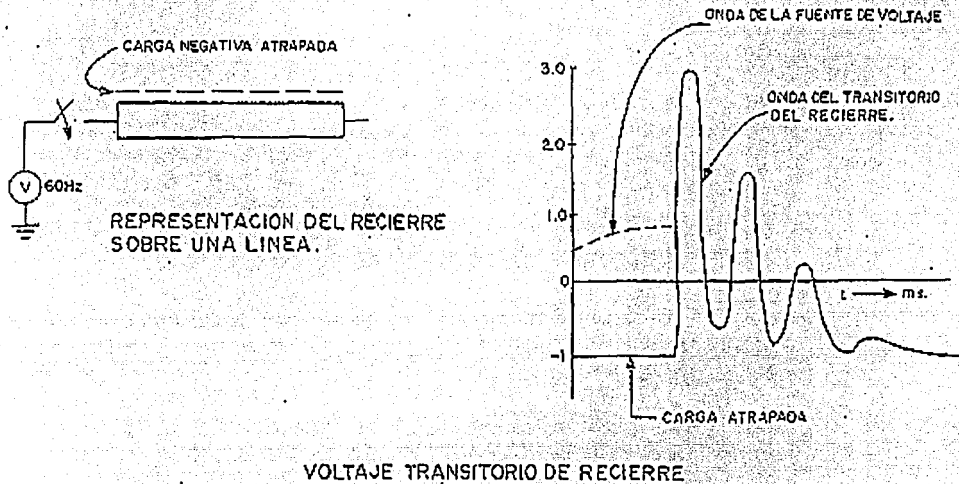


Fig. 1.5.- Sobretensión por recierre de una línea de transmisión con carga atrapada, Referencia [24].

Las tensiones nominales y máximas normalizadas para las líneas de transmisión son:

PARA:	230 kV	245 kV
	400 kV	420 kV
	500 kV	525 kV
	750 kV	785 kV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De manera que para una tensión nominal de 400 kV con una tensión máxima de 420 kV, el valor base para el cálculo en por unidad (p.u.) es:

$$V_{in} * \sqrt{2} / \sqrt{3} = 420 * \sqrt{2} / \sqrt{3} = 343 kV$$

si en el sistema se calculara un valor de 900 kV como tensión máxima por maniobra de interruptores, este valor expresado en por unidad es:

$$900 / 343 = 2.62 pu$$

El cociente anterior expresado en por unidad se conoce como factor de sobrevoltaje y de acuerdo con la norma IEC-71, estos valores se definen como la relación del valor pico del sobrevoltaje al valor pico o a la amplitud del voltaje nominal de fase a tierra del sistema.

Considerando un sistema de 400 KV en el que la tensión máxima es de 420 KV, la amplitud del voltaje de línea a neutro es 343 KV, el nivel básico de aislamiento al impulso de acuerdo con normas, corresponde a 1425 kV para los aislamientos externos; este valor cumple con el permisible para un impulso de rayo con onda de 1.2/50 microsegundos, el esfuerzo permisible contra sobretensiones por maniobra es de 1050 kV, (aproximadamente el 73% del NBI) da un factor de sobrevoltaje máximo permisible de:

$$I_{SMP} = 1.050 / 343 = 3.06 pu$$

Las redes eléctricas con menores voltajes de operación tienen un nivel de aislamiento más alto por lo general, por lo que se pueden permitir mayores factores de sobrevoltaje, en redes de muy alta tensión es deseable por razones de reducción de costo en los aislamientos de máquinas y aparatos, así como por una reducción en las distancias eléctricas entre fases y de fase a tierra, reducir dentro de lo posible los factores de sobrevoltaje a valores de 2.0 a 2.5 pu [3].

Sobretensiones temporales

Las sobretensiones temporales son voltajes oscilatorios con una duración relativamente larga, no amortiguados o ligeramente amortiguados, la magnitud y duración de este tipo de sobretensiones somete a los sistemas eléctricos y a sus elementos de protección, como los apartarrayos, a requerimientos severos en su capacidad de descarga y su estabilidad térmica; por lo que una estimación precisa de su probabilidad de ocurrencia es esencial para determinar las características necesarias de los apartarrayos como elementos de atenuación de las mismas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La presencia de las sobretensiones temporales en los sistemas eléctricos se debe a su rápido crecimiento y a la interconexión de los mismos entre las diferentes áreas de operación de los grandes sistemas eléctricos, que a su vez elevan los niveles de corto circuito y en muchos casos dificultan el adecuado control de algunos de sus parámetros; a las condiciones de operación de los mismos, sobretodo cuando no se cuenta con los elementos de apoyo suficientes para lograrlo, a la presencia de algunos elementos fundamentales en la operación de los sistemas eléctricos, así como a los modernos equipos empleados por los usuarios.

Tomando en cuenta que el desarrollo de los sistemas eléctricos modernos tiende a la interconexión de las diferentes áreas de control, a que la calidad de servicio depende de la continuidad y de la confiabilidad y que estas a su vez requieren en alguna medida de la redundancia de los elementos constitutivos de los sistemas, y aceptando que las características de los factores asociados a los fenómenos que producen las sobretensiones temporales, están íntimamente ligados con este tipo de políticas de expansión de los sistemas eléctricos, podemos inferir que las sobretensiones temporales forman parte medular de la operación de los sistemas eléctricos de potencia.

Las sobretensiones temporales son sobretensiones de carácter probabilístico debido a los factores aleatorios involucrados en los fenómenos que las producen; los factores también están asociados con la forma en que se opera el sistema y la configuración del mismo, y con eventos tales como maniobras de interruptores, perturbaciones bruscas de carga, variaciones de voltaje, la aleatoriedad de los puntos sobre la línea donde se producen las fallas etc.; en la practica estas sobretensiones ocurren como consecuencia de maniobras en los sistemas debidas a fallas o acciones correctivas y de operación [39].

Existe una alta probabilidad de coincidencia de sobretensiones temporales y de maniobra o por descargas atmosféricas, que obviamente son más severas que cualquiera de las independientes; la sobretensión resultante incluye dos o más componentes, una a frecuencia muy cercana a la fundamental y otra transitoria denominada sobretensión por maniobra estandarizada como impulso de 250/2,500 μ s, y/o una sobretensión por descarga atmosférica estandarizada como impulso por descarga atmosférica de 1.2/50 μ s.

La magnitud de las sobretensiones temporales y sus posibles combinaciones con otros tipos de sobretensiones, someten a los componentes de los sistemas eléctricos y a sus elementos de protección, los apartarrayos, a requerimientos muy severos en su capacidad de descarga y su estabilidad térmica, por lo que es fundamental una estimación correcta de la probabilidad de ocurrencia y de las características de las sobretensiones esperadas, para determinar a su vez las características con que deben de contar los apartarrayos como elementos de protección[24].

Las sobretensiones temporales se pueden clasificar en tres diferentes grupos de acuerdo con los niveles de los componentes de la frecuencia de la sobretensión:

Grupo 1. Sobretensiones temporales con una frecuencia de oscilación muy cercana a la frecuencia de operación del sistema, producidas por fenómenos tan variados como la pérdida repentina de carga, cortos circuitos asimétricos, efecto capacitivo en líneas de transmisión largas con el extremo de entrega abierto (efecto Ferranti), resonancia en circuitos lineales producida por fases abiertas o por operación no sincronizada de interruptores, resonancia inducida entre circuitos acoplados y oscilaciones armónicas en circuitos no lineales.

Si se conocen las magnitudes máxima y mínima y las sobretensiones temporales que pueden ocurrir en un sistema, es posible calcular la distribución de sus valores utilizando la siguiente expresión:

$$P(V_e \geq V) = K \left(\frac{1}{AV} - E \right)^{m+1} - \left(1 - \frac{1}{AV_{min}} \right)^{m+1}$$

$$K = \frac{1}{\left[\left(1 - \frac{1}{AV_{max}} \right)^{m+1} - \left(1 - \frac{1}{AV_{min}} \right)^{m+1} \right]} \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{\Delta V_{min}} + \frac{1}{\Delta V_{min}} - 1$$

La fórmula anterior [24] fue obtenida empíricamente como resultado de una serie de 80,000 mediciones realizadas en los sistemas de la antigua URSS., en que $P(V_e \geq V)$ es la probabilidad de que la sobretensión V_e en el extremo abierto de la línea sea mayor que un valor V ; el factor A es la relación entre el voltaje en el nodo de envío y el voltaje en el extremo abierto de la línea ($A \leq 1$), podemos suponer $A = 1$, el exponente m depende de la forma de conexión de los reactores conectados en paralelo en las líneas de transmisión; una línea de transmisión con estos elementos conectados permanentemente, con reactores que se desconectan por medio de un controlador durante cada recierre automático, o para líneas sin reactores en paralelo consideramos $m = 2$; si los reactores en paralelo se conectan y desconectan de acuerdo a la potencia transmitida, $m = 0$.

La duración de las sobretensiones transitorias para el caso de maniobras originadas por fallas (corto circuito, recierre automático, etc.), con operación simultánea en ambos lados de la línea con señales de microondas o carrier, tiene valores típicos entre 0.02 y 0.15 seg, si actúa una protección de respaldo, la duración será entre 0.3 y 0.5 segs.

Grupo 2. Sobretensiones temporales con frecuencia de oscilación mayor a la frecuencia de operación del sistema; este tipo de sobretensiones se debe a oscilaciones forzadas con armónicas superiores pares o impares.

Básicamente existen dos casos de importancia practica:

a) Resonancia de estado estable: un circuito típico en el que puede ocurrir este fenómeno se presenta cuando la corriente de magnetización que fluye por la inductancia no lineal L_m , contiene componentes de la frecuencia fundamental y componentes de armónicas superiores impares; su probabilidad de ocurrencia es muy baja.

b) Resonancia transitoria: Se presenta durante maniobras en líneas terminadas en un transformador sin carga, o maniobras en el secundario de un transformador en el extremo de entrega de una línea, produciendo armónicas pares e impares.

Grupo 3. Sobretensiones temporales subarmónicas. Son características en líneas de transmisión con compensación en serie, en algunas ocasiones su probabilidad de ocurrencia llega a 10%; aunque para un sistema bien diseñado, esta probabilidad es cercana a cero [24].

De acuerdo con la experiencia practica de algunos países, la magnitud de las sobretensiones transitorias en sistemas de potencia reales, no llega a valores mayores de 2.0 pu, [1], [3], [8], [16], [17], [19], [24], [29], [34] [39], [42], [43].

TENSIONES Y SOBRETENSIONES REPRESENTATIVAS

Tensión permanente (a la frecuencia del sistema).

En condiciones normales de operación puede esperarse que la tensión a la frecuencia del sistema varíe un poco en magnitud y difiera de un punto a otro del sistema, para propósitos de coordinación de aislamiento y de diseño del aislamiento, la tensión permanente representativa debe considerarse constante e igual a la tensión máxima del sistema; en la práctica, hasta 72.5 kV, la tensión máxima del sistema U_s , puede ser substancialmente menor que la tensión máxima para el equipo U_m , mientras que con el incremento de la tensión ambos valores tienden a ser iguales.

Sobretensiones temporales.

Las sobretensiones temporales se caracterizan por sus amplitudes, sus formas de onda y sus duraciones. Todos los parámetros dependen del origen de las

sobretensiones, además, las amplitudes y formas de onda pueden aún variar durante el transcurso de la sobretensión.

Para propósitos de coordinación de aislamiento, la sobretensión temporal representativa se considera que tiene la forma de la tensión normalizada de corta duración (1 min) a la frecuencia del sistema. Su amplitud puede ser definida por un valor (el máximo supuesto), un conjunto de valores pico, o una distribución estadística completa de valores pico. La selección de la amplitud de la sobretensión representativa debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Las amplitudes y las duraciones de las sobretensiones reales en servicio.
- La característica de aguante amplitud-duración a la frecuencia del sistema del aislamiento considerado.

Si la característica amplitud-duración no es conocida, para simplificar, la amplitud puede ser tomada igual a la máxima sobretensión real que tenga una duración real menor de 1 min en servicio y la duración de esta máxima sobretensión se puede tomar de 1 min.

En casos particulares, se puede adoptar un procedimiento de coordinación de aislamiento estadístico en el que se describan las sobretensiones representativas mediante una distribución de frecuencias amplitud-duración de las sobretensiones temporales que se esperan en servicio [24].

Fallas a tierra

Una falla de fase a tierra puede resultar en sobretensiones de fase a tierra que afecten las otras dos fases. Normalmente no se presentan sobretensiones temporales entre fases o a través del aislamiento longitudinal. La forma de onda de la sobretensión es la de una tensión a la frecuencia del sistema.

Las amplitudes de las sobretensiones dependen del aterrizamiento del neutro del sistema y de la localización de la falla, en configuraciones normales del sistema se recomienda suponer la amplitud de la sobretensión igual a su máximo valor; en configuraciones anormales del sistema, por ejemplo, partes del sistema con neutros no aterrizados en un sistema con neutro normalmente aterrizado, se debe tratar en forma separada, tomando en cuenta su probabilidad de ocurrencia simultáneamente con las fallas a tierra.

La duración de la sobretensión corresponde a la duración de la falla hasta su libramiento, en sistemas con neutro aterrizado, es generalmente menor de 1 segundos; en sistemas con neutro aterrizado resonante, la liberación de la falla, es generalmente menor de 10 segundos; en sistemas sin libramiento de falla a tierra, la duración puede ser de varias horas. En el último caso puede ser necesario definir la

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

tensión permanente a frecuencia del sistema como el valor de la sobretensión temporal durante la falla a tierra [27].

Rechazo de carga

Las sobretensiones temporales de fase a tierra y longitudinales, debidas a rechazo de carga, dependen de la carga rechazada, de la configuración del sistema después de su desconexión y de las características de las fuentes (potencia de cortocircuito en la subestación, regulación de tensión y de velocidad de los generadores, etc.).

Los incrementos de tensión de fase a tierra en las tres fases son idénticos, y por lo tanto, ocurren en la misma proporción las sobretensiones de fase a tierra y de fase a fase, estos incrementos pueden ser especialmente importantes en el caso de un rechazo de carga en el extremo remoto de una línea larga (efecto Ferranti), porque éstos principalmente afectan a los equipos de la subestación conectados del lado fuente del interruptor abierto remoto [8].

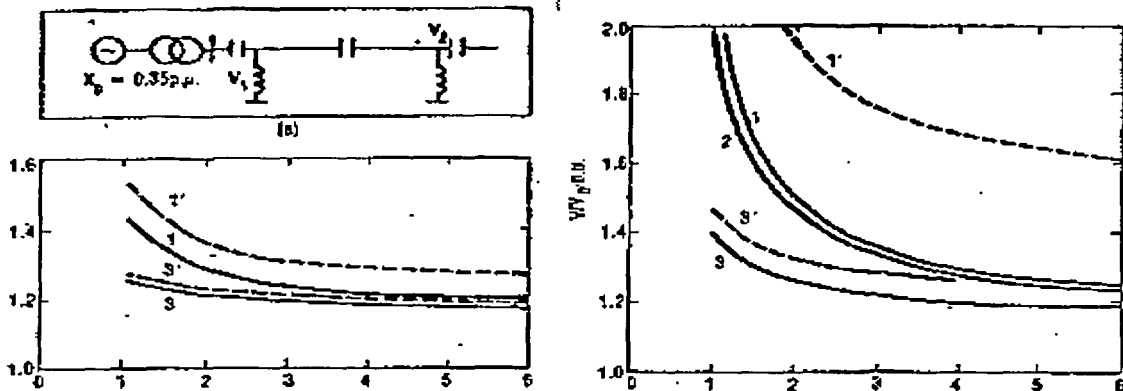


Fig. 1.6.- Sobretensiones a frecuencia nominal provocada por rechazo de carga, Referencia [24].

La figura 1.6 representa el efecto de sobretensiones por rechazo de carga de dos líneas de transmisión de 400 kV [24], con carga inicial de 33% del nivel de corto circuito en el extremo de envío, las líneas tienen longitudes de a) 300 y b) 600 km respectivamente, las curvas 1 y 1' corresponden a líneas no compensadas, la curva 2 a líneas con compensación capacitiva serie de 50% y las líneas 3 y 3' con 50% de compensación capacitiva serie y 70 % de compensación reactiva paralelo; las curvas 1, 2 y 3 corresponden a los voltajes en el nodo de envío, las curvas 1' y 3' a los voltajes en el nodo de recepción; el voltaje en el extremo de recepción de la línea puede ser significativamente mayor que el del generador, debido al efecto

Ferranti de la línea y en adición el aumento en la frecuencia nominal aumenta la reactancia inductiva en serie y la corriente de carga en la línea.

Las sobretensiones temporales longitudinales dependen de la diferencia del ángulo de fase después de la separación de la red, la peor situación posible es cuando hay una oposición de fase.

En el análisis de sobretensiones temporales, se recomienda considerar la tensión de referencia de 1.0 p.u. igual a: $\sqrt{2} (U_n / \sqrt{3})$.

- En sistemas moderadamente extendidos, un rechazo de carga total puede dar lugar a sobretensiones con amplitudes generalmente menores a 1,2 p.u. La duración de las sobretensiones dependen de la operación del equipo de control de tensión y puede ser hasta de varios minutos.
- En sistemas extendidos, después de un rechazo de carga total, las sobretensiones de fase a tierra pueden alcanzar 1,5 p.u. o aún más cuando ocurren efectos de resonancia o Ferranti. Su duración puede ser del orden de algunos segundos.
- Si solo hay cargas estáticas del lado del rechazo, la sobretensión temporal longitudinal generalmente es igual a la de fase a tierra. En sistemas con motores o generadores en el lado del rechazo, una separación de red puede dar lugar a una sobretensión temporal longitudinal, con dos componentes de sobretensión de fase a tierra en oposición de fase, cuya amplitud máxima es generalmente menor de 2,5 p.u. (pueden observarse valores más grandes para casos excepcionales como son los sistemas de alta tensión muy extendidos).

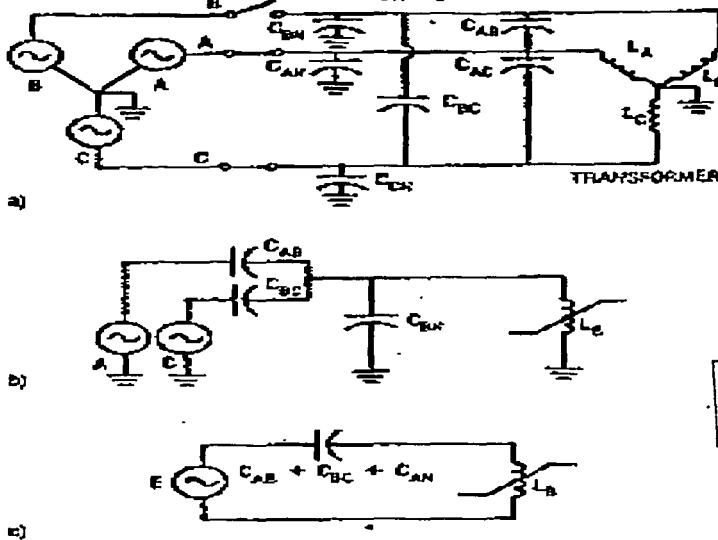
Resonancia y ferorresonancia.

Las sobretensiones temporales por estas causas, generalmente se presentan cuando se energizan circuitos con grandes elementos capacitivos (líneas, cables, líneas compensadas en serie) y elementos inductivos (transformadores, reactores en paralelo) con características no lineales de magnetización, o como resultado de un rechazo de carga.

Las sobretensiones temporales debidas al fenómeno de resonancia pueden alcanzar valores extremadamente altos y deben prevenirse o limitarse; no deben considerarse como base para la selección de la tensión nominal del apartarrayos o para el diseño del aislamiento a menos que otros métodos no sean suficientes.

La figura 1.7 nos muestra un circuito trifásico con una fase abierta sujeto a ferorresonancia en la ilustración a), y sus circuitos equivalentes

simplificados en las ilustraciones b) y c); la figura 1.8) muestra la variación de los sobretensiones ferrorresonantes producidos por la apertura de la fase, con diferentes escalas de graficación [37].



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 1.7.- Circuito trifásico, equivalente y simplificado fase b abierta sujeto a ferrorresonancia, Referencia [24].

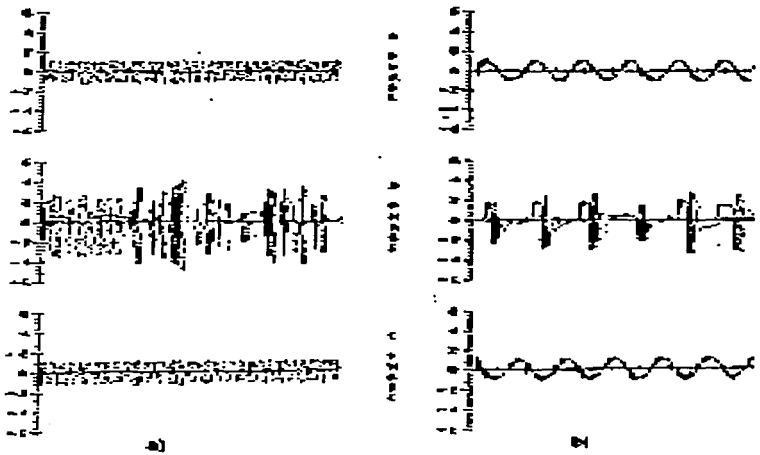


Fig. 1.8.- Sobretensiones ferrorresonantes producidas por la apertura de una fase, Referencia [24].

Sobretensiones longitudinales

Las sobretensiones longitudinales entre las terminales durante la energización o reenergización están compuestas por la tensión de operación permanente en una de las terminales y la sobretensión de maniobra en la otra; en sistemas sincronizados, el pico más alto de la sobretensión de maniobra y la tensión de operación tienen la misma polaridad, por lo que el aislamiento longitudinal tiene una sobretensión menor que el aislamiento de fase a tierra.

El aislamiento longitudinal entre sistemas no sincronizados puede estar sujeto a sobretensiones de energización en una terminal y al pico de la tensión de operación normal de polaridad opuesta en la otra terminal.

Para la componente de la sobretensión de frente lento se aplican los mismos principios que para el aislamiento de fase a tierra.

Sobretensiones longitudinales durante la sincronización

Las sobretensiones representativas temporales longitudinales se derivan de la sobretensión esperada en servicio, la cual tiene una amplitud igual a dos veces la tensión de operación de fase a tierra y una duración desde varios segundos hasta algunos minutos.

Más aún, cuando la sincronización es frecuente, la probabilidad de ocurrencia de una falla a tierra y la sobretensión consecuente deben ser consideradas. En tales casos, las amplitudes de las sobretensiones representativas son la suma de la máxima sobretensión supuesta por una falla a tierra en una terminal y la tensión permanente de operación en oposición de fase en la otra.

Combinaciones de sobretensiones temporales con origen diferente

Las sobretensiones temporales de orígenes diferentes pueden tratarse como combinadas solamente después de un examen cuidadoso de su probabilidad de ocurrencia simultánea. Tales combinaciones pueden conducir a la selección de apartarrayos con valores nominales más altos, y por consecuencia mayores niveles de protección y de aislamiento; los cuales se justifican solo técnica y económicamente si la probabilidad de ocurrencia es suficientemente alta.

Sobretensiones por falla a tierra con rechazo de carga

Las sobretensiones de frente lento debidas al rechazo de carga son de importancia únicamente en sistemas de categoría II, en los cuales las

sobretensiones por energizar o desenergizar son controladas a valores por debajo de 2 p.u; en tales casos, ellos necesitan análisis, especialmente cuando son implicados generadores, transformadores o líneas de transmisión largas.

Esta combinación puede existir cuando, durante una falla de la línea, el interruptor del lado de la carga abre primero y la carga desconectada causa una sobretensión por rechazo de carga en la parte fallada del sistema hasta que abre el interruptor del lado de la fuente.

La combinación de falla a tierra con rechazo de carga puede también existir cuando una gran carga se desconecta y la sobretensión temporal debida a esto, causa una falla a tierra en el resto del sistema. La probabilidad de este evento es pequeña cuando las sobretensiones debidas al cambio de carga son ellas mismas pequeñas y la falla subsecuente solo es probable que ocurra en condiciones extremas tales como en contaminación alta.

La combinación puede también ocurrir como un resultado de una falla de la línea seguida de una falla durante la apertura de un interruptor. La probabilidad de tal combinación, aunque pequeña no es despreciable ya que estos eventos no son estadísticamente independientes. Esta combinación resulta cuando el generador se conecta mediante un transformador a una línea larga fallada, lo cual puede producir una sobretensión significativa en las fases sanas. La sobretensión consiste de un transitorio de frente lento y una prolongada sobretensión temporal variable, que es función de las acciones del gobernador y del regulador de tensión [19].

Efecto de las sobretensiones en los apartarrayos.

Descargas atmosféricas

Los apartarrayos de Zno ofrecen mejor protección contra las sobretensiones por descargas atmosféricas que los apartarrayos comunes, por lo cual concluimos que:

-Se logra una disminución de flameo y por lo tanto una reducción acelerada de la caída de potencial desde el frente de onda del voltaje de flameo hasta el voltaje residual de los apartarrayos de carburo de silicio.

-La característica voltaje-corriente de los apartarrayos de óxidos metálicos es prácticamente plana comparada con los apartarrayos de carburo de silicio

-Se requieren menores niveles de protección contra las corrientes de descarga nominales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Sobretensiones temporales en instalaciones protegidas con apartarrayos

Usualmente la selección de la tensión nominal del apartarrayos se basa en la envolvente de la sobretensión temporal esperada, tomando en cuenta la capacidad de disipación de energía del apartarrayos; en general igualar el valor nominal del apartarrayos con el esfuerzo de la sobretensión temporal es más crítico en la categoría II, donde los márgenes son menores que en la categoría I; generalmente la capacidad de energía del apartarrayos bajo esfuerzo de sobretensión temporal se expresa como una característica de amplitud-duración suministrada por el fabricante.

Para propósitos prácticos los apartarrayos no limitan sobretensiones temporales, con excepción de las sobretensiones temporales debidas a efecto de resonancia para las que los apartarrayos pueden ser aplicados para limitar o aun prevenir dichas sobretensiones; para esta aplicación se hacen estudios cuidadosos de los esfuerzos térmicos impuestos en los apartarrayos, para evitar su sobrecarga.

Sobretensiones de frente lento.

Estas sobretensiones tienen duraciones de frente desde decenas hasta miles de microsegundos, y duraciones de cola del mismo orden de magnitud y son oscilatorias por naturaleza; generalmente se originan por:

- energización y reenergización de líneas,
- fallas y liberación de fallas,
- Rechazos de carga,
- maniobras de corrientes inductivas o capacitivas,
- impacto de rayo lejano a los conductores de líneas aéreas.

El esfuerzo de tensión representativo esta caracterizado por:

- Una forma de tensión representativa,
- Una amplitud representativa, la cual puede ser una sobretensión máxima asumida o una distribución de probabilidad de las amplitudes de las sobretensiones.

La forma representativa de tensión, es el impulso por maniobra normalizado, (tiempo de pico 250 μ s, y tiempo al valor medio de la cola 2500 μ s), la amplitud representativa es la amplitud de la sobretensión, considerada independiente de su tiempo de pico real; sin embargo, en algunos sistemas en la categoría II, pueden ocurrir sobretensiones con frentes muy largos, y la amplitud representativa puede ser obtenida considerando la influencia de la duración del frente sobre la rigidez dieléctrica del aislamiento {3}.

La distribución de probabilidad de las sobretensiones sin la operación del apartarrayos, es caracterizada por su valor 2%, su desviación y su valor de truncación, aunque no es perfectamente válido; la distribución de probabilidad puede ser aproximada por una distribución gaussiana del valor 50% al valor de truncación sobre el cual se supone que no existen valores; alternatively se puede utilizar una distribución modificada de Weibull [24].

El valor máximo supuesto de la sobretensión representativa es igual al valor de truncación de las sobretensiones o igual al nivel de protección al impulso por maniobra del apartarrayos considerando el valor menor.

Sobretensiones debidas a energización y reenergización de líneas.

La energización o reenergización de una línea trifásica produce sobretensiones de maniobra en las tres fases de la línea, por lo tanto, cada operación de maniobra produce tres sobretensiones de fase a tierra y correspondientemente tres sobretensiones de fase a fase (1).

En la evaluación de las sobretensiones para aplicación práctica, se han introducido algunas simplificaciones; con relación al número de sobretensiones por operación de maniobra se usan dos métodos:

-Método fase-pico aplicando tres picos por operación de maniobra, tomando los valores pico más altos de cada sobretensión entre fase y tierra, es decir, cada operación contribuye con tres valores pico a la distribución de probabilidad de las sobretensiones representativas; en consecuencia esta distribución tiene que suponerse igual para cada uno de los tres aislamientos de fase a tierra, el mismo método se aplica para las sobretensiones entre fases o longitudinales para los correspondientes aislamientos de fase a fase o longitudinal.

-Método de pico-máximo con un pico por operación de maniobra se toma el valor pico más alto de todas las sobretensiones entre fase y tierra, es decir, cada operación contribuye con un solo valor a la distribución de probabilidad de las sobretensiones representativas; en consecuencia, esta distribución se aplica a cada aislamiento de fase a tierra, el mismo método se aplica para las sobretensiones entre fases para el aislamiento de fase a fase.

Las amplitudes de las sobretensiones debidas a la energización de líneas depende de diversos factores, incluyendo el tipo de interruptor (con resistencia de preinserción o sin ella), la naturaleza y la potencia del cortocircuito en la barra desde la cual la línea es energizada, la naturaleza de la compensación usada y la longitud de la línea energizada y del tipo de terminación de la línea energizada (abierta, transformador, o apartarrayos).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una reenergización trifásica puede generar altas sobretensiones de frente lento, debidas a cargas atrapadas en la reenergización de la línea; al tiempo de la reenergización la amplitud de la sobretensión remanente en la línea, (debida a la carga atrapada) puede ser tan alta como el pico de la sobretensión temporal; la descarga de esta carga atrapada depende del equipo que permanece conectado a la línea o la conductividad superficial de los aisladores o las condiciones de efecto corona en el conductor y del tiempo de recierre.

En sistemas normales la reenergización monopolar no genera sobretensiones más altas que aquellas producidas por energización; sin embargo para líneas en donde los efectos Ferranti o resonante pueden ser significativos, el recierre monopolar puede causar sobretensiones mayores que en una energización trifásica.

La distribución de probabilidad correcta de las amplitudes de las sobretensiones, se puede obtener solo mediante la simulación cuidadosa de las operaciones de maniobra por medio de programas digitales, analizadores de transitorios, etc., y los valores típicos que se muestran en la figura 1.9 deben considerarse como una guía general; todas las consideraciones se refieren a las sobretensiones en el extremo abierto de la línea (lado receptor); las sobretensiones en el extremo emisor pueden ser substancialmente menores que las del extremo abierto.

La fig.1.9 muestra la gama de los valores de sobretensión 2% (en p.u. de $\sqrt{2}U_{\phi}/\sqrt{3}$) que se pueden esperar entre fase y tierra sin limitación por apartarrayos, la información esta basada en algunos resultados de campo y estudios que incluyen los efectos de la mayoría de los factores que determinan las sobretensiones, [24]

La figura 1.9 puede ser utilizada como una indicación de si las sobretensiones pueden ser lo suficientemente altas como para causar problemas o no; si es así, la gama de valores indica qué tanto pueden limitarse las sobretensiones, para este propósito podrían ser requeridos estudios más detallados.

Sobretensiones de fase a fase

En la evaluación de las sobretensiones de fase a fase se debe agregar como parámetro adicional, el aislamiento sensible a la subdivisión de un valor dado de sobretensión de fase a fase en dos componentes de fase a tierra, la selección de un instante específico debe tomar en cuenta las características del aislamiento; se consideran dos instantes:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

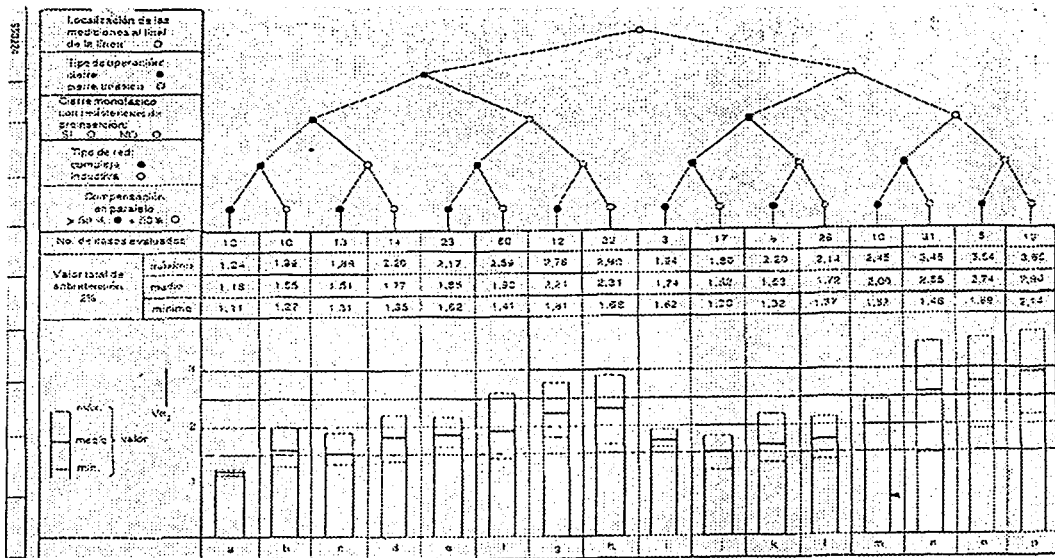


Fig 1.9 Sobretensiones de frente lento de rango 2% en el extremo receptor durante la energización y reenergización de líneas de transmisión, Ref. [19] IEC71-2.

a) instante del pico de la sobretensión de fase a fase: Este instante da el valor de sobretensión fase a fase más alto, representa el esfuerzo máximo para todas las configuraciones de aislamiento para las cuales la rigidez dieléctrica entre fases no es sensible a la subdivisión en componentes, ejemplos típicos son el aislamiento entre devanados o las distancias cortas en aire.

b) sobretensión fase a fase en el instante del pico de la sobretensión fase a tierra: Aunque este instante da sobretensiones de valores menores que el instante del pico de la sobretensión de fase a fase, puede ser más severo para configuraciones de aislamiento para las cuales la rigidez dieléctrica entre fases es influenciada por la subdivisión en componentes, como las distancias grandes en aire, para las cuales el instante del pico positivo de fase a tierra es el más severo, o en las subestaciones en SF₆ con ductos trifásicos para las cuales el pico negativo es el más severo; se concluye que para todos los tipos de aislamiento, excepto para las distancias en aire en la categoría II, la sobretensión representativa entre fases es igual al pico de la sobretensión de fase a fase; para distancias en aire en la categoría II, particularmente para tensiones de sistema iguales o mayores de 500 kV, la sobretensión representativa de fase a fase debe determinarse de los picos de sobretensión de fase a tierra y de fase a fase.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El valor de sobretensión 2% de fase a fase se puede determinar aproximadamente de la sobretensión de fase a tierra; la figura 1.10 muestra la gama de posibles relaciones entre los valores 2% de fase a fase y de fase a tierra; el límite superior de esta gama se aplica a sobretensiones por reenergización trifásica rápida y el límite inferior a sobretensiones por energización trifásica [24].

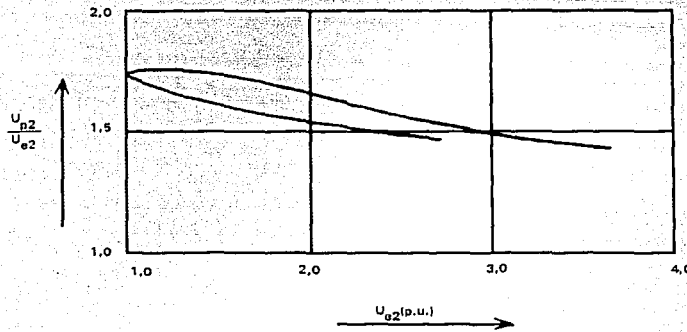


Fig. 1.10. Relación entre los valores 2% de las sobretensiones de frente lento de fase a fase y de fase a tierra, Ref. [19] IEC 71-2

Sobretensiones máximas asumidas.

Si no se aplica protección con apartarrayos, la sobretensión máxima asumida por energización o reenergización es :

- para la sobretensión de fase a tierra: el valor de truncación U_{e1} ;
- para la sobretensión de fase a fase: el valor de truncación U_{p1} o, para el aislamiento externo en la categoría II, el valor determinado de acuerdo al criterio de probabilidad de Weibull ambos subdivididos en dos componentes iguales con polaridades opuestas;
- para sobretensiones longitudinales: el valor de truncación U_{e1} de la sobretensión de fase a tierra debido a la energización en una terminal y el pico de polaridad opuesta de la tensión normal de operación en la otra terminal.

Esta definición de la máxima tensión longitudinal, supone que las frecuencias del sistema están sincronizadas en ambas terminales, por lo cual las sobretensiones longitudinales debidas a la reenergización no necesitan considerarse separadamente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Sobretensiones por falla y por liberación de falla

Las sobretensiones de frente lento son generadas al inicio y al liberar una falla por el cambio en la tensión, desde la tensión de operación hasta la sobretensión temporal en las fases no falladas y el regreso desde un valor cercano a cero hasta la tensión de operación en la fase fallada; ambos orígenes causan únicamente sobretensiones entre fase y tierra, las sobretensiones entre fases son despreciables. Estimaciones conservadoras para asumir el valor máximo de la sobretensión representativa U_{et} son:

- inicio de falla $U_{et} = (2k - 1) U_s \sqrt{2} / \sqrt{3}$ (kV valor pico)
- liberación de falla $U_{et} = 2,0 U_s \sqrt{2} / \sqrt{3}$ (kV valor pico)

en donde k es el factor de falla a tierra.

En la categoría I, las sobretensiones causadas por fallas a tierra deben considerarse para sistemas con transformadores con neutro aislado o resonante conectado a tierra, en los cuales el factor de falla a tierra es aproximadamente igual a $\sqrt{3}$; para tales sistemas la coordinación de aislamiento puede basarse en la sobretensión máxima asumida y la probabilidad de sus amplitudes no necesita tomarse en cuenta.

En la categoría II, cuando las sobretensiones debidas a energización o reenergización de líneas son controladas a valores menores de 2 p.u., las sobretensiones por falla o por liberación de falla requieren de un cuidadoso análisis si no son controladas en el mismo grado.

Sobretensiones debidas a maniobra de corrientes inductivas y capacitivas

La maniobra de corrientes inductivas o capacitivas pueden dar origen a sobretensiones que pueden requerir atención; en particular, las operaciones de maniobra siguientes deben ser tomadas en cuenta:

- interrupción de corrientes de arranque de motores;
- interrupción de corrientes inductivas, por ejemplo cuando se interrumpe una corriente de magnetización de un transformador o cuando se desconecta un reactor paralelo;
- maniobra y operación de hornos de arco y sus transformadores, los cuales pueden originar corte de corriente;
- operación de cables de potencia sin carga y bancos de capacitores;

-interrupción de corrientes con fusibles media tensión.

Cuando ocurren reencendidos de interruptores mientras interrumpen corrientes capacitivas (interrupción de líneas sin carga, cables o bancos de capacitores) pueden generar sobretensiones particularmente peligrosas y se hace necesario el uso de interruptores libres de reencendido; cuando se energizan bancos de capacitores, en particular, bancos no aterrizados, debe tenerse cuidado de determinar las sobretensiones de fase a fase.

Sobretensiones de frente lento por descargas atmosféricas

En sistemas con líneas largas (mayores de 100 km), las sobretensiones de frente lento por descargas atmosféricas son originadas por rayos distantes que caen en un conductor de fase, cuando la corriente de rayo es suficientemente pequeña como para no causar un flameo del aislamiento de la línea y cuando la incidencia ocurre a una distancia suficiente grande del lugar considerado como para producir un frente lento.

Como las corrientes de rayo tienen tiempos al valor medio que raramente exceden 200 μ s no ocurren sobretensiones de gran amplitud ni de tiempos a la cresta críticos para el aislamiento; por lo tanto, las sobretensiones de rayo de frente lento son de importancia menor para la coordinación de aislamiento y usualmente son despreciadas.

Limitación de sobretensiones de frente lento

El método más comúnmente empleado para limitar las sobretensiones por maniobra es usando resistencias de preinserción en los interruptores de las líneas de transmisión; también pueden emplearse otros medios, como el control de la apertura en el cruce por cero de la onda y varistores a través de las cámaras de interrupción, para limitar las sobretensiones debidas a energización de líneas y por maniobras de corrientes inductivas o capacitivas.

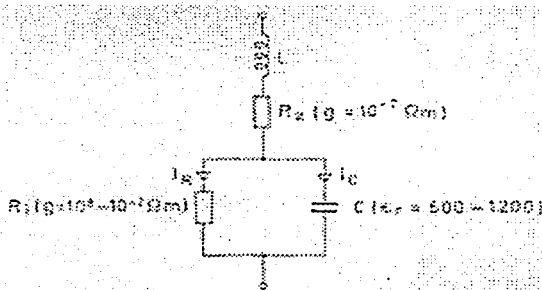
Los transformadores de potencial inductivos conectados a las terminales de las líneas reducen efectivamente las cargas atrapadas en las fases de la línea después de la apertura; de esta forma, las sobretensiones de frente lento debidas a la subsecuente reenergización trifásica son limitadas a niveles similares a la energización simple de una línea [1], [3], [13], [15], [21], [22], [24], [29], [38], [39], [42], [43].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 2.- APARTARRAYOS DE ÓXIDOS METÁLICOS

El óxido de metal que se emplea en los apartarrayos es un material cerámico formado por una mezcla de óxido de zinc con pequeños partes de un material aditivo constituido por trióxido de bismuto Bi_2O_3 , óxido de cobalto CoO , trióxido de cromo Cr_2O_3 , óxido de manganeso MnO y trióxido de antimonio Sb_2O_3 en una mezcla granulada, seca, presionada en forma de discos y finalmente sinterizada.

Los granos de óxido de zinc con aproximadamente $10 \mu\text{m}$ de diámetro, tienen baja resistividad y son rodeados por una mezcla granular de alta resistividad, formada con los otros óxidos señalados, los cuales tienen un espesor de aproximadamente $0.1 \mu\text{m}$, dicha mezcla está fuertemente enlazada entre sí; el arreglo puede ser representado mediante el circuito equivalente mostrado en la fig. 2.1 en donde R_i representa la resistencia no lineal de los elementos granulares, donde la resistividad ρ cambia desde $100,000,000 \Omega\text{-m}$ para valores bajos de campo eléctrico a $.01 \Omega\text{-m}$ para altos esfuerzos; las capas granulares tienen una constante dieléctrica relativa de entre 500 y 1,200 dependiendo del proceso de fabricación; R_z es la resistencia de los granos de óxido de zinc y su resistividad es de aproximadamente $.01 \Omega\text{-m}$., L representa la inductancia de los discos de óxido de metal la cual es determinada por la geometría de la trayectoria del flujo de corriente [44].



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.1 Circuito equivalente de un disco de óxidos metálicos. Referencia [14] Metal oxide surge arresters in AC systems grupo 06 de estudio comité 33 CIGRE.

Característica voltaje-corriente.

La característica voltaje-corriente para la componente resistiva I_r y la componente capacitiva I_c de la corriente a través del disco de óxido de metal mostrado en la figura 2.2, está basada en el mecanismo de conducción de la microestructura mencionada, las características de la componente resistiva son divididas en tres regiones:

a) Región de campo eléctrico baja (región 1)

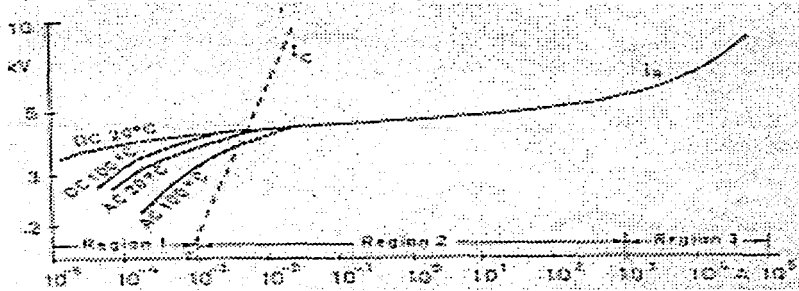


Fig. 2.2 Características Tensión Corriente típicas de óxidos metálicos referencia [3].

El mecanismo de conducción en esta región se explica mediante barreras de medidas de energía en las placas granulares, las barreras propician que los electrones se muevan de un grano a otro.

El campo eléctrico aplicado tiene el efecto de disminuir esas barreras y los electrones pasan a través de ellas térmicamente (emisión Schottky), y produce una pequeña elevación de la corriente a través del material, la densidad de corriente está dada aproximadamente por la siguiente ecuación:

$$J_r = J_0 \exp \left[\frac{\sqrt{Ee^3 / 4\pi\epsilon} - \phi_B}{kT} \right] \quad (1)$$

Donde J_0 es una constante que depende del material y la geometría de las placas granulares, ϕ_B la barrera potencial, E el esfuerzo del campo eléctrico, e la carga del electrón, ϵ la constante dieléctrica, k constante de Boltzmann's y T la temperatura absoluta.

Altas temperaturas aumentan la energía de los electrones y de esta manera pueden pasar a través de las barreras más fácilmente.

b) Región eléctrica de campo medio (región 2)

Cuando el campo eléctrico en las placas granulares sube aproximadamente a 100 kV/mm, los electrones se mueven a través de las barreras mediante el efecto túnel quedando ahora la densidad de corriente representada por la ecuación 2.

$$J_r = J_1 \exp \left[- (A\phi_B^{3/2} / E) \right] \quad (2)$$

donde J_1 y A son constantes para un material específico.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

c) Región de campo eléctrico alta (región 3)

En esta región la caída de voltaje en la barrera durante el efecto de túnel es pequeña y la caída de voltaje a través de la resistencia R_z de los granos de óxido de zinc domina, la corriente entonces se aproxima gradualmente a la región lineal, con una densidad de corriente J_r descrita por la siguiente ecuación:

$$J_r = E / \rho \quad (3)$$

Las características voltaje corriente de las resistencias de carburo de silicio se describen mediante la siguiente ecuación:

$$I = KU^\alpha \quad (4)$$

Donde K y α son constantes para un material específico, si cada fórmula es empleada para la componente resistiva de la corriente a través de los discos de óxido metálico, se puede enfatizar que un simple exponente no puede describir la característica completa, el exponente α aplicado depende de la región de conducción y puede variar entre 3 y 50; en una región específica no siempre deben ser aplicadas cantidades generalizadas, por lo que las características de los apartarrayos se pueden lograr por la determinación de las constantes [8].

De acuerdo a la IEC 71-2 [19] las características de voltaje-corriente pueden ser derivadas del voltaje de referencia y la corriente de referencia y el voltaje residual de las corrientes de impulso por maniobra y descargas atmosféricas.

En principio la capacitancia del disco depende del voltaje y la temperatura, en algunos casos esa dependencia puede ignorarse, por ejemplo, para el cálculo de la distribución del voltaje a lo largo del apartarrayos al voltaje de operación.

En las regiones 1 y 2 el voltaje aplicado al apartarrayos cae a través de las placas granulares, por lo que es necesario tomar medidas para evitar descargas externas a través de las cubiertas exteriores de los granos de óxido de zinc.

Con objeto de mantener la disipación de energía en el apartarrayo durante la operación a mínimo voltaje, el voltaje continuo de operación del apartarrayo ha venido cambiando en la región 1, en esta región el pico de la componente de la corriente resistiva es usualmente menor de 1 mA y la componente capacitiva de la corriente es predominante; lo que significa que la distribución del voltaje, al voltaje de operación es capacitivo, y por lo tanto está influenciado por capacitancias de fuga.

La componente resistiva de la corriente a través del varistor de óxidos metálicos en la región 1 depende del arreglo granular, por lo tanto depende de los materiales de manufactura y del tipo de fabricación; por lo tanto es posible una

variación de la característica de la corriente resistiva mediante el empleo de diferentes lotes de producción y en particular de diferentes medios de manufactura.

La influencia capacitiva y la corriente de dispersión características, implican que la supervisión del apartarrayos por medio de las escalas de corriente, solo es posible, cuando la corriente es medida al propio apartarrayos en operación; así mismo la influencia de la temperatura de acuerdo con la ecuación 1 o la fig. 3, también debe ser considerada tomando en cuenta, que la componente resistiva de la corriente cambia prácticamente 3 por ciento por grado centígrado.

Las características de protección del apartarrayos son determinadas por la característica de voltaje-corriente en la región 2 y la región 3, en esas regiones las influencias de temperaturas y capacitancias han desaparecido y la desviación de la distribución del voltaje lineal a lo largo del apartarrayos es solo determinada por la dispersión de la característica voltaje-corriente resistiva, puede considerarse que esa dispersión es pequeña y la distribución de voltaje lineal.

Las características de los arreglos granulares de los apartarrayos de óxidos de metal se pueden degradar con los siguientes efectos:

a) Reacciones químicas en los alrededores del material

Cuando las características de la vecindad del material contienen moléculas de gas incompatibles, los óxidos en los arreglos granulares pueden reaccionar químicamente con los gases, cada gas puede ser formado en operación por la presencia de descargas parciales dentro de la envolvente, pero las reacciones químicas han sido prevenidas mediante diseños especiales cubriendo la superficie del varistor.

b) Esfuerzos debidos al voltaje de operación a temperatura ambiente

Estos esfuerzos causan una degradación lenta del material granular, es decir, causan el envejecimiento del material; el grado de envejecimiento depende de su naturaleza y de la calidad del arreglo granular que puede reducirse a una escala prácticamente despreciable.

c) Altos esfuerzos de corriente

La altas corrientes a través del varistor, pueden adelantar las densidades excesivas de corriente a través del arreglo granular destruyéndolo parcialmente, por lo que los materiales seleccionados para estas aplicaciones deberán garantizar una degradación despreciable.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

d) El envejecimiento de los materiales

El envejecimiento de los materiales es evaluado mediante estándares de IEC, a través de pruebas, la degradación del material mediante reacciones químicas se ha incluido tentativamente debido a la limitación de los requerimientos de productos de descomposición, como puede ser la presencia de gases en sus alrededores.

Estabilidad térmica.

Como se muestra en la fig. 2.2 y en la fórmula 1[44], la componente de corriente resistiva y la disipación de energía en un apartarrayo durante la elevación de voltaje de operación, se incrementa con la temperatura en función de un exponente mayor que 1 ($E_c > 1$), la disipación de energía se lleva a cabo desde los bloques del apartarrayo a través de la cubierta y su contacto con el medio ambiente; para alcanzar la estabilidad térmica, la energía transferida puede exceder la suma de la potencia suministrada constituida por la disipación de energía y la radiación.

La temperatura a la cual la estabilidad térmica empieza depende de las características constructivas y de operación del apartarrayos: condiciones de transferencia de calor, características del material y voltaje de operación aplicado; la energía necesaria para elevar esa temperatura depende de la temperatura inicial de los bloques resistores, que puede no ser igual en todo el apartarrayo al mismo tiempo; una distribución no lineal de voltaje a través del apartarrayo también puede ocasionar temperaturas iniciales desiguales, lo cual es muy probable cuando la superficie es conductiva, por ejemplo en condiciones de alta contaminación.

El tiempo en el cual una alta energía puede ser consumida dentro del apartarrayos, puede variar entre algunos microsegundos (10) para sobretensiones por descargas atmosféricas, a algunos segundos para el caso de sobretensiones temporales; los tiempos cortos no crean condiciones más severas, debido a la desigualdad de temperaturas entre los bloques y a la transferencia de energía.

Un apartarrayos de óxido de metal puede ser térmicamente inestable solo a temperaturas elevadas, generalmente las temperaturas del varistor cercanas a los 100° C son suficientes; a estas temperaturas la distribución del voltaje es lineal, siempre que la temperatura no sea absolutamente la misma en todos los bloques; la estabilidad térmica por lo tanto no es afectada solo por la calidad del apartarrayos y puede ser probada a voltaje de operación continuo. [3], [8], [22], [24], [25], [44], [45], [46].

Características de operación de apartarrayos de óxidos metálicos

El apartarrayo de óxido de metal es designado térmicamente estable debido a que la corriente a través del apartarrayo a voltaje de operación nominal del

sistema, permanece en la región 1 de la característica de voltaje-corriente como se muestra en la fig. 2.2; la corriente a través del block de óxido metálico del varistor es principalmente capacitiva en esa región, manteniendo los discos de óxido de metal a una elevada temperatura; consecuentemente los voltajes a través de los elementos varistores son determinados por su capacitancia y por lo tanto influenciados por las capacitancias de dispersión.

En apartarrayos tipo intemperie los discos de óxido metálico usualmente construidos dentro de una envolvente de porcelana que sella herméticamente la parte activa con el medio ambiente, los discos pueden representarse eléctricamente como capacitores conectados en serie, las capacitancias de fuga a tierra producen una desviación de la distribución lineal del voltaje, produciendo altos esfuerzos de voltaje en los elementos superiores del apartarrayo; esa desviación de la distribución lineal es influenciada por diferentes parámetros, tales como la altura en la que se ubica el apartarrayos, el número y la longitud de las unidades del apartarrayos y los anillos graduadores.

En condiciones de contaminación, las corrientes de acoplamiento capacitivo entre la superficie de la porcelana y la columna de los elementos de óxido metálico, el acoplamiento óhmico entre pestañas y partes activas, sobretodo en apartarrayos múltiples, da lugar a una mayor distorsión de la distribución de voltaje.

En ambos casos el voltaje de distribución no lineal produce que un número de varistores de óxido metálico incrementen el voltaje de operación continuo y consecuentemente el esfuerzo térmico.

Con objeto de optimizar la distribución de voltaje a lo largo de los ejes de los apartarrayos se deben tomar en cuenta la influencia de los siguientes aspectos:

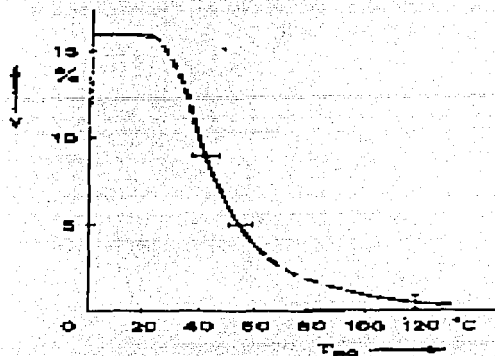
- a) La temperatura de operación
- b) El lugar de instalación de los apartarrayos
- c) Las condiciones físicas del medio

La figura 2.3 representa los resultados de la distribución lineal de voltaje de prueba de un apartarrayos tipo estación de 360 kV, montado en un plano de tierra, el cual fue sometido a variaciones de temperatura desde 0 a 120° centígrados

Como se observa en la figura 2.3 la distribución del voltaje lineal para tres temperaturas ambiente 20, 35 y 50° centígrados al voltaje continuo de operación, la máxima desviación para la distribución del voltaje lineal ocurrió en la unidad superior y correspondió 16% a 20°C, a 9% a 35°C y a 5% a 50°C de temperatura ambiente respectivamente.

Incrementando la temperatura de la componente de corriente óhmica del varistor, se puede producir una distribución de voltaje más lineal en el apartarrayos,

cambiando el rango de temperatura en la distribución del voltaje desde capacitivo no lineal



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.3 Desviación máxima de la distribución lineal de voltaje de un apartarrayo con la temperatura, Referencia Performance of metal oxide surge arresters under operating voltage B Bachmann and A Shei. Electra.

a lineal resistivo, dependiendo de la amplitud de la componente de corriente resistiva a voltaje continuo de operación; sin embargo esto no se puede generalizar para todos los apartarrayos, aunque una tendencia común permite suponer que un rango de transición de temperatura es tamizado a altas temperaturas para los varistores modernos, para los que las pérdidas de energía son más pequeñas que en apartarrayos convencionales; por lo tanto es conveniente aplicar la característica de voltaje corriente de los varistores actualmente utilizados en los apartarrayos.

Características de protección de los apartarrayos de óxidos metálicos

Las características de protección de los apartarrayos de óxidos metálicos sin entrehierro están completamente descritas por el circuito equivalente del elemento varistor y el fenómeno de conducción de corriente, dichas características son determinadas por:

La característica voltaje-corriente incluyendo el tiempo de retraso para cambio en el mecanismo de conducción desde efecto térmico hasta efecto túnel, la capacitancia formada por la conexión serie-paralelo del arreglo granular, la inductancia de los elementos del varistor determinada por la geometría de la trayectoria de la corriente en elemento varistor y en la de retorno.

Se han venido llevando cabo diversas investigaciones sobre el tiempo de retraso de la corriente de conducción a través del varistor, eliminando el efecto de la inductancia del circuito equivalente o corrigiendo por comparación con un block de metal con la misma geometría, con lo cual se comprueba la definición para las formas de corriente y voltaje del estándar IEEE 1989 [24]; el voltaje es caracterizado

por un pico inicial U_{ri} mostrando un retraso de tiempo en el mecanismo de conducción, la forma de voltaje como un voltaje residual máximo distante que en general ocurre antes del instante máximo, siempre y cuando una inductancia libre en un arreglo coaxial de varistores sea empleada en la prueba.

En un estudio del congreso del comité 33 de CIGRE en Tokio [24], se llegó al acuerdo que el voltaje pico U_{ri} inicial depende del paso del cierre del voltaje al principio del flujo de la corriente, esta conclusión es soportada por el propio mecanismo de conducción, que depende del esfuerzo del campo dieléctrico en un arreglo granular del varistor de óxido de metal, lo cual conduce a definir un tiempo equivalente t_0 a un voltaje U_0 al cual la conducción empieza; el instante del pico del voltaje U_{ri} y el punto resultante contra ese tiempo se muestra en la figura 2.4 siguiente:

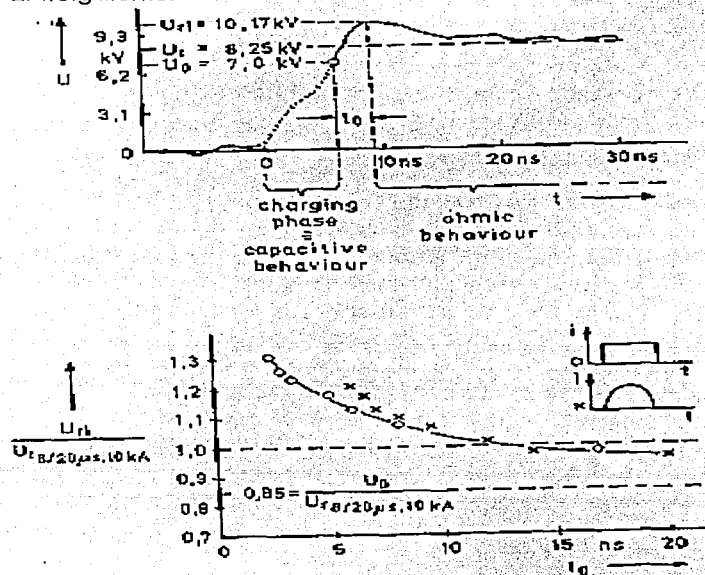
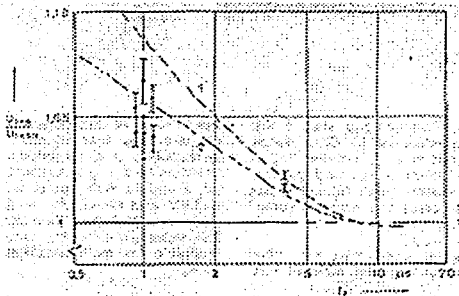


Fig. 2.4 Definición de tiempos, voltajes y voltaje pico inicial a voltaje residual a una corriente de descarga en función del tiempo. Ref: Protection of performance of metal oxide surge arresters, A.R.Hileman, J Roguin, K H Weck Gpo 06 Comité 33 CIGRE.

Los resultados muestran que el pico inicial es más alto que el voltaje residual a la corriente de descarga nominal únicamente si t_0 es menor de 15 nseg, ese valor corresponde a un paso de aproximadamente 80 kV/mseg por un block varistor simple; para grandes apartarrays con rangos de voltaje de 100 kV y mayores estos voltajes significan variaciones de voltaje de más de 2000 kV/mseg, con lo cual se demuestra que ese retraso de tiempo es despreciable para la mayor parte de las aplicaciones prácticas [6].

Todas las medidas por lo tanto indican que para corrientes en el rango de tiempo de las descargas atmosféricas, el voltaje pico residual ocurre antes de la corriente pico, esto es cierto siempre y cuando la caída de voltaje inductivo sea excluida por un arreglo adecuado de las medidas del voltaje de circuito; además se presenta un incremento del voltaje con un decremento de tiempo diferente a la corriente, la figura 2.5 muestra los resultados tomados de una prueba, para los cuales los efectos de las pruebas de las inductancias del circuito se eliminaron, para la ilustración del mecanismo físico.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.5. - Tensión residual V_{res} referida a V_{resn} a corriente nominal de descarga, función de la corriente de tiempo de frente, Ref. [6] Protection of performance of metal oxide surge arresters, A.R.Hileman, J Roguin, K H Weck Gpo 06 Comité 33 CIGRE.

La figura 2.6 muestra las características dinámicas voltaje corriente para un block de varistores con una corriente nominal de descarga de 10 kiloamperes para 2 formas de onda de corriente de impulso de 1/2.5 y 8/20 μ segs respectivamente [6]; de la gráfica se observa que las dos características difieren en su valor de corriente de frente, aunque accesan en la parte final de la corriente; la diferencia en voltaje residual para las dos formas de onda permanece aproximadamente constante durante el tiempo de frente, como se puede ver la diferencia de voltaje es independiente de la amplitud de la corriente, las características vienen a ser esencialmente similares al final de la corriente, lo cual demuestra que los efectos de inductancia no se presentan y que la característica manifiesta un tiempo de retraso en el mecanismo de conducción de los arreglos granulares.

El tiempo de retraso de conducción se manifiesta adicionando una resistencia en serie con la resistencia no lineal de estado estable de los arreglos granulares, representando a los apartarrayos de óxidos de metal mediante el circuito equivalente mostrado en la figura 2.7a, la resistencia dependiente de la corriente del arreglo

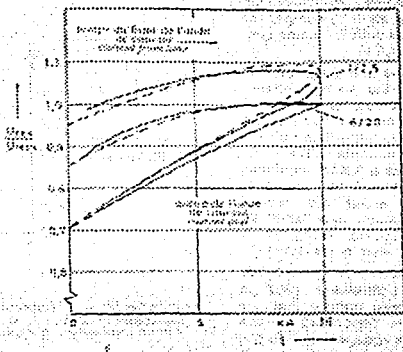


Fig. 2.6. - Características voltaje-corriente de un block varistor de óxidos metálicos, Referencia [6] Protection of performance of metal oxide surge arresters, CIGRE.

granular es subdividida entre la resistencia de estado estable R_i , la resistencia de giro R_t y la resistencia dependiente de la temperatura R_θ , representando el comportamiento del apartarrayos en un rango bajo de corriente; para mejorar el funcionamiento de la protección la resistencia dependiente de la temperatura R_θ y la capacitancia C se desprecian y las resistencia dependientes de la corriente R_i y del material de los óxidos de metal R_z se combinan en una resistencia R_l como función del voltaje residual a diferentes amplitudes de corrientes de impulso $8/20 \mu\text{seg}$, lo cual se muestra en la fig 2.7b [6].

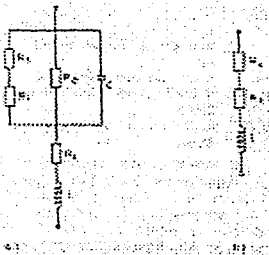


fig. 2.7.- Circuito equivalente de un apartarrayos de óxidos metálicos completo y simplificado, Ref. Protection of performance of metal oxide surge arresters, CIGRE.

La resistencia R_l es obtenida de los voltajes residuales de las corrientes de impulso de $8/20 \mu\text{seg}$, con varios valores pico eliminando los efectos inductivos; el efecto del elemento de giro puede ser descrito mediante un análisis del comportamiento gráfico o por aplicación de cálculos numéricos de ondas viajeras mediante la ecuación diferencial siguiente [6]:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G_{ref}}{T} \left(1 + \frac{G}{G_{ref}} \right) \left(1 + \frac{G}{G_{ref}} \left(\frac{1}{I_{ref}} \right)^2 \right) e^{\frac{U}{U_{ref}}} \quad (5)$$

con:

$$U_{ref} = .57(U_{res1} - U_{resN}) \quad (6)$$

$$G_{ref} = 34 \frac{1}{U_{resN}} \quad (7)$$

donde:

G: conductancia de giro

Gref: conductancia de referencia

U: voltaje de referencia en kV

Uref: voltaje de referencia en kV

Uresn: voltaje residual a la corriente nominal de descarga 8/20 μ s en kV

Ures1: voltaje residual al paso de la corriente de impulso 1/...

amplitud igual a la corriente de descarga nominal en kV

I: corriente a través del elemento

Iref: corriente de referencia igual a 5.4 kA .

T tiempo de referencia 80 mseg.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La condición inicial para la conductancia es $G=0$, los valores de referencia Gref, Uref e Iref son obtenidos de los resultados obtenidos en pruebas, la curva 2 en la figura 2.5 representa la característica dinámica de voltaje-corriente para $U_{ref}=.034 U_{resn}$.

La inductancia L del circuito equivalente representa la inductancia de la trayectoria de corriente a través del apartarrayo, dependiendo del procedimiento de cálculo empleado, esta puede ser representada mediante un valor de inductancia o por una impedancia característica y un tiempo de viaje, los valores típicos para apartarrayos son los siguientes:

-Apartarrayos tipo exterior:

Inductancia: 1 mH/m de longitud del apartarrayos.

Tiempo de viaje 3.33 nseg/m de longitud de apartarrayos.

Impedancia característica 300 ohms.

-Apartarrayos en subestaciones encapsuladas:

Inductancia: .33 mH/m de longitud del apartarrayos

Tiempo de viaje 3.33 nseg/m de longitud del apartarrayos

Impedancia característica 100 ohms.

[3], [6], [8], [11], [22], [24], [28], [33], [36], [44], [45], [46].

Comportamiento de los apartarrays de óxidos metálicos ante maniobras de interruptores

Debido a su principio de operación los apartarrays de óxidos metálicos trabajan desde la llamada primera línea de defensa, cuando se instalan en el extremo de la líneas de transmisión sin un sistema de control remoto de voltaje, como los que se instalan en subestaciones encapsuladas o los instalados en los transformadores de distribución o potencia o en líneas de transmisión abastecidas desde subestaciones distantes cuando operan en vacío.

Los beneficios de la protección del aislamiento de las líneas de transmisión y los equipos eléctricos asociados mediante apartarrays de óxido de metal es notable, especialmente en sistemas trifásicos con recierre rápido; el efecto de este tipo de protección comparado con los apartarrays convencionales se puede analizar mediante los resultados de las pruebas de los apartarrays instalados en entrada de líneas de transmisión de 420 kV sometida a recierres súbitos; la característica de voltaje residual derivada del análisis a través del diagrama equivalente se muestra en la figura 2.8.

La figura 2.9 muestra el sobrevoltaje de recierre obtenido en el extremo abierto de una línea de 380 kV, 200 km de longitud, para los siguientes casos: sin apartarrays en sus extremos gráficas a y b, con apartarrays de carburo de silicio con entrehierro las gráficas c y d, en donde los sobrevoltajes de fase a tierra alcanzan el nivel de protección de impulso por maniobra (850 kV), las gráficas e y f muestran los sobrevoltajes obtenidos empleando apartarrays de óxido de metal, para este caso los sobrevoltajes de fase a tierra son limitados prácticamente a los niveles de protección de impulso por maniobra del apartarray (700 kV); el sobrevoltaje permanece plano por un tiempo comparativamente largo.

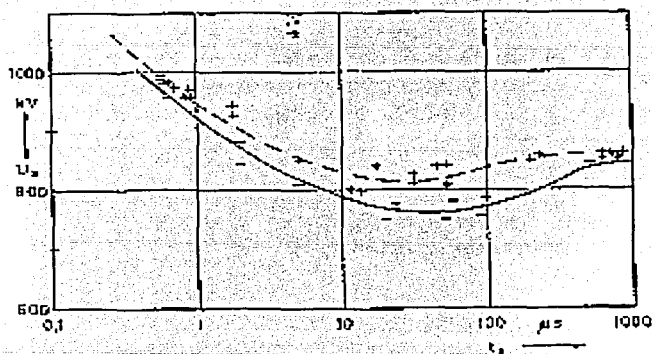


Fig. 2.8 Característica de voltaje residual U_{res}/U_{resn} respecto del tiempo T_f , Ref. Protection of performance of metal oxide surge arresters, CIGRE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

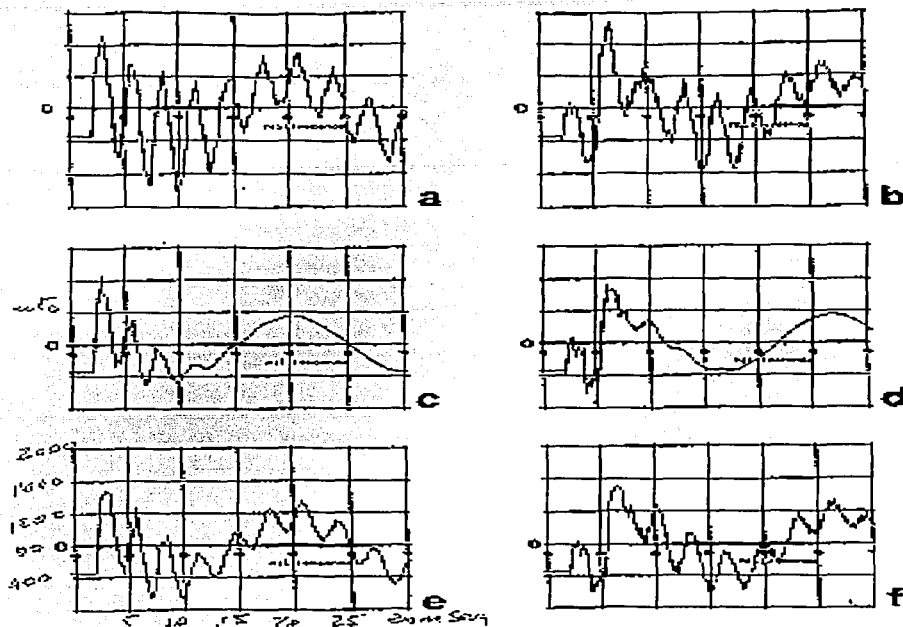


Fig. 2.9 Sobretensión por maniobra de una línea de 380 kV, 200 km, Ref. Protection of performance of metal oxide surge arresters, A.R.Hileman, J Roguin, K H Weck Grupo 06 Comité 33 CIGRE.

La figura 2.10 muestra la probabilidad de la distribución del sobrevoltaje de fase a tierra sin apartarrayos curva 1, con apartarrayos de óxidos metálicos en los extremos de la línea curva 2; como puede observarse dicha probabilidad puede ser radicalmente modificada mediante la aplicación de apartarrayos de óxidos metálicos en la entrada de las líneas a la subestación, en donde también observamos que la probabilidad del riesgo de flameo curva 3 de la misma figura, es bastante baja para con la aplicación de dichos apartarrayos [6]. la IEC establece que los apartarrayos de óxido de metal requieren la determinación del voltaje residual de maniobra de impulso a dos corrientes la y .25la dando lugar a voltaje residuales U_{a1} y $2la U_{a2}$ respectivamente, experimentalmente se muestra que la característica voltaje-corriente entre .25la y 2la puede ser linealizada con un error menor del 2%, por lo que la característica de voltaje-corriente es entonces:

$$U_a = U_{ao} + K * I$$

con

$$U_{ao} = 4 / 3 U_{a2} - 1 / 3 U_{a1}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

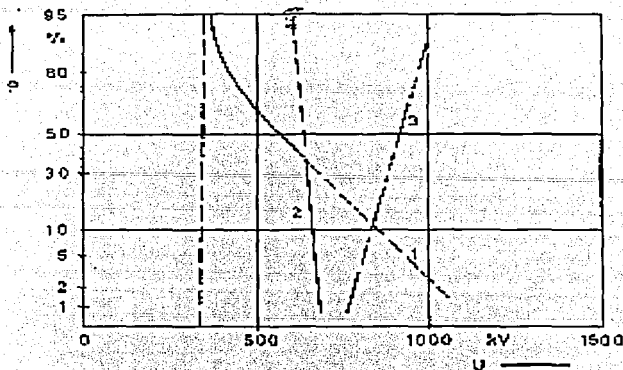


Fig. 2.10 Probabilidad de densidad de una sobretensión de fase a tierra con y sin apartarrays de óxidos metálicos, Ref. Protection of performance of metal oxide surge arresters, A.R.Hileman, J Roguin, K H Weck Grupo 06 Comité 33 CIGRE.

y

$$K = 4/3(U_{a1} - U_{a2}) / I_a$$

Para apartarrays

$$U_{a0} = 640 \text{ kV}$$

$$k = 35 \Omega$$

Para sobrevoltajes 640 kV la distribución de sobrevoltaje original cambia dentro de una forma modificada caracterizada por la siguiente relación [27]:

$$U = K \frac{K}{Z+K} U + \frac{Z}{Z+K} U_{a0}$$

$$\sigma_n = \frac{K}{Z+K} \sigma$$

Donde U y σ son la distribución de la desviación media y estándar y Z la impedancia característica de la línea de transmisión conectada; con $Z = 350$ ohms los nuevos valores pueden ser:

$$U = 635$$

$$\sigma = 21$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La distribución es mostrada en la curva 2 de la figura 2.12, como se observa las dos curvas se interceptan en U_{a0} , la probabilidad de exceder ese valor es de 38%.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.11 Probabilidad de densidad de sobretensión de fase a tierra por recierre súbito de un interruptor, Ref. [6] Protection of performance of metal oxide surge arresters.

La figura 2.11 compara las dos probables densidades sin apartarrayos curva 1 y con apartarrayos de óxidos metálicos curva 2 para el caso tratado, la alta densidad de amplitud alrededor del nivel de protección del apartarrayos es evidente, la alta densidad tiene consecuencias para la coordinación de aislamiento, cuando el nivel de protección del apartarrayos se aplica con el máximo valor de sobre-voltaje que puede ocurrir en el equipo, para aislamientos externos por ejemplo estas consecuencias pueden ser descritas por riesgo de falla; con objeto de demostrar el efecto se hacen las siguientes consideraciones:

El riesgo de falla para apartarrayos de óxidos metálicos es considerado igual a .001 por fase, luego esto significa que el riesgo para la operación de maniobra en un circuito trifásico es igual a $3 \times .001$ porque todas las fases son igualmente esforzadas en promedio.

La figura 2.10 muestra las gráficas de probabilidad de distribución de voltajes de fase a tierra, la curva tres representa la probabilidad de flameo del aislamiento debido a un riesgo de flameo de descarga de 1000 kV, a la probabilidad para equipos sin apartarrayos, curva1, y equipos con apartarrayos de óxidos metálicos curva2, la probable distribución del sobrevoltaje esperado es descrito por 2% del valor de U_2 en pu y una desviación estándar de:

$$\sigma = .25(U_2 - 1) \text{ PU}$$

La relación necesaria entre el voltaje resistente del equipo en servicio, llamada coordinación de voltaje resistente del nivel de protección al impulso por maniobra del apartarrayos de óxidos de metal, depende del 2% del valor del sobrevoltaje dado en la figura 2.12; el nivel de protección del apartarrayos es empleado como un parámetro; para apartarrayos de carburo de silicio son usuales valores de 2.6 pu en relaciones de 1.05, para apartarrayos de óxidos de metal entre 1.8 y 2 pu con relaciones de 1.11.

Teniendo en cuenta que los aislamientos externos por norma deben ser diseñados para operar en altitudes hasta de 1000 msnm, la mínima relación entre el rango de maniobra de impulso del voltaje resistente y el nivel de protección de maniobra al impulso del apartarrayos recomendado en la IEC, es 1.15 para apartarrayos de

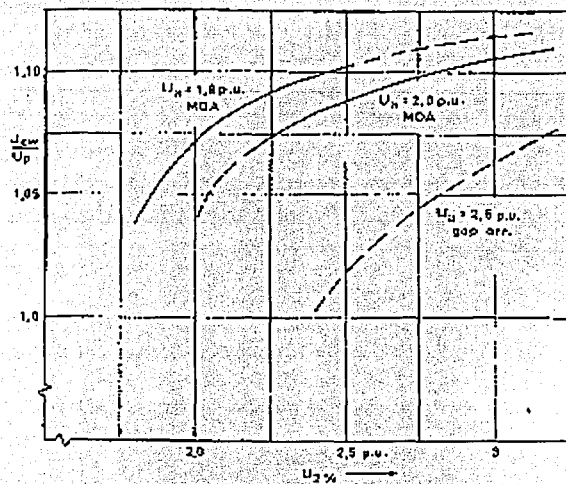


Fig. 2.12 Relación tensión de coordinación nivel de protección de apartarrayos de óxidos metálicos, Ref: Protection of performance of metal oxide surge arresters, CIGRE.

carburo de silicio y 1.25 para los apartarrayos de óxidos metálicos en la especificación de los estándares para los apartarrayos de óxido de metal, para probar los aislamientos externos del apartarrayos y es aplicable para todos los aislamientos externos [19].

Para elementos internos no es posible una adecuada evaluación de la dispersión del esfuerzo del aislamiento, se considera que el aislamiento resistente cuando la amplitud del sobrevoltaje es menor que el voltaje resistente y rompe a un valor menor cuando este está por encima, esto significa que un aislamiento interno tiene un riesgo de falla igual a la probabilidad de que una amplitud de sobrevoltaje, exceda el voltaje resistente del aislamiento.

Cuando la tensión de aguante de un aislamiento interno cuyo rango ha sido seleccionado con un margen por arriba del nivel de protección, varía de este a valores más bajos debido al envejecimiento del aislamiento o durante la dispersión en montaje y operación, se pueden considerar las siguientes posibilidades.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

-El riesgo de falla se mantiene en cero así como el voltaje resistente permanece arriba del nivel de protección del apartarrayos.

-Cuando la tensión resistente cae abajo del nivel de protección del aislamiento del apartarrayos, el riesgo rápidamente aumenta la probabilidad de falla por la distribución en sistema del sobrevoltaje esperado, este incremento súbito es de alto y de bajo nivel de protección del apartarrayo.

-Por lo tanto es recomendable adoptar una relación de 1.25 entre rango del voltaje resistente y el nivel de protección, el cual para aislamientos externos aumenta con el decremento del nivel de protección, con objeto de tomar en cuenta incertidumbres del esfuerzo del voltaje actual del equipo en servicio, [1], [3], [6], [8], [19], [24], [25], [28], [36], [38], [44], [45] [46].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 3.- ESFUERZOS EN APARTARRAYOS DE ÓXIDOS METÁLICOS

El diseño adecuado del nivel de aislamiento eléctrico de un sistema de potencia, debe llegar a un balance entre la capacidad para soportar esfuerzos eléctricos y el costo y la confiabilidad de los elementos de protección del sistema contra tales esfuerzos. La capacidad para soportar un esfuerzo eléctrico puede requerir de aislamiento adicional, que incremente la confiabilidad pero que a su vez implique mayor inversión, normalmente el costo representa un factor limitante mayor que la factibilidad técnica.

La ruptura o deterioro del aislamiento depende de la magnitud, forma y duración del esfuerzo eléctrico a que éste se sujeta, los fenómenos físicos involucrados en la ruptura de un aislamiento son diferentes para distintos tipos de esfuerzos; por lo que actualmente, las normas internacionales clasifican los esfuerzos típicos encontrados en los sistemas de potencia, definiendo las características de aguante del aislamiento en base a cada tipo de esfuerzo.

La clasificación de los esfuerzos eléctricos y de las sobretensiones se establecen en la norma IEC-71 [19] mostrada en la tabla 1.1 Cap 1, incluye la definición de una forma de esfuerzo respecto al tiempo para cada clase y forma de esfuerzo, así como un rango de valores para las frecuencias y períodos de tiempo involucrados, y una forma y prueba estandarizada.

Como antes mencionamos el voltaje nominal definido como el voltaje eficaz (rms) entre fases, a la frecuencia de operación de un sistema de potencia operando bajo condiciones normales, representa un esfuerzo eléctrico continuo aplicado al aislamiento de los elementos del sistema, por lo cual es muy importante considerarlo en el proceso de envejecimiento del mismo así como en los efectos de contaminación.

Durante ciertos períodos de la operación de los sistemas eléctricos, en los que las tensiones máximas alcanzan valores superiores a los normales de operación hasta en 5 o 10% y mayores, las normas nacionales NMX-J-150-1, NMX-J-150-2 [20], etc., y las internacionales IEC 71-1 e IEC 71-2 [19], establecen valores recomendados del voltaje máximo de operación para efectos de estandarización del equipo del sistema, por ejemplo, la norma NMX-J-098 contiene tablas en rangos de 1KV a 230 KV y mayores de 230 KV.

Los esfuerzos en los apartarrayos de óxidos metálicos son diferentes a los esfuerzos en los apartarrayos convencionales, en muchos casos las sobretensiones temporales no son capaces de lograr que los apartarrayos convencionales actúen bajo condiciones de sobretensión; por otro lado, bajo las mismas condiciones de operación, los apartarrayos de óxidos metálicos conducen con gran facilidad magnitudes de corriente suficientes para causar sobrecalentamiento excesivo en los elementos resistentes; adicionalmente a los factores que influyen en la presencia de las sobretensiones, así como la amplitud y duración de las mismas y la forma en que estos

puedan influir en el sistema, son los factores fundamentales en la determinación de la selección del rango de voltaje de los apartarrayos [27]; por lo que es sumamente importante tomar en cuenta los orígenes y los rangos de los diferentes tipos de sobretensiones, así como las características de comportamiento de cada uno de ellas, de las que podemos enumerar entre los más sobresalientes los siguientes:

- Fallas monofásicas y bifásicas a tierra
- Cambios repentinos por rechazo de carga
- Capacitancia de líneas en vacío (efecto Ferranti)
- Efectos de saturación, resonancia y ferorrresonancia

Fallas de una fase o de dos fases a tierra

Una falla a tierra produce una sobretensión temporal no amortiguada que persiste hasta que el esquema de protección opera mediante una maniobra que suprime la falla, el tipo más común de falla se produce entre una fase y tierra, causando una sobretensión en las fases sanas, que se sostiene hasta que se corrige la anomalía entre las impedancias de secuencia cero y secuencia positiva del sistema, vistas desde el punto donde ocurre la falla; por lo tanto, su magnitud está relacionada con el tipo de aterrizamiento del sistema, dicha sobretensión es de alrededor de 1.4 pu para sistemas sólidamente aterrizados y puede llegar a 1.73 pu o más en sistemas no aterrizados [31].

Un sistema sólidamente aterrizado se define como aquel en que el voltaje máximo efectivo entre fase y tierra, en una de las fases sanas durante una falla, es 80% o menor que el voltaje nominal entre las fases del sistema donde se localiza la falla.

Las normas incluyen gráficas para obtener el factor de aterrizamiento K, en base a las relaciones entre la resistencia de secuencia positiva, la resistencia y la reactancia de secuencia cero, con la reactancia de secuencia positiva, $R1/X1$, $R0/X1$ y $X0/X1$, desde el punto donde ocurre la falla fig. 3.1; el factor de aterrizamiento es la razón entre el voltaje efectivo máximo de fase a tierra en una fase sana durante una falla y el voltaje efectivo de operación del sistema entre fase y tierra, para un sistema aterrizado efectivamente $K = \sqrt{3} * 0.8 = 1.4$



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 3.1 Configuración básica de fallas a tierra en sistemas eléctricos

Las fallas de fase a tierra o de dos fases a tierra pueden crear sobretensiones temporales de fase o de dos fases a tierra en las fases sanas, en los diferentes puntos de la red y en función de los parámetros en juego de la misma, la Fig. 3.2 muestra los valores del factor de sobretensión k_{30} [27], contra la relación X_0/X_1 con los parámetros R_0/X_1 para las condiciones mencionadas; si la resistencia de falla es despreciada, el factor de sobretensión temporal en las fases sanas puede ser calculado por:

a) Falla monofásica a tierra

$$K_{30} = \frac{1}{2} \{ (3Z_0 / Z_1) / (2 + Z_0 / Z_1) \pm j\sqrt{3} \} \quad (1)$$

b) Falla bifásica a tierra

$$K_{30} = (3Z_0 / Z_1) / (1 + 2Z_0 / Z_1) \quad (2)$$

donde:

$Z_1 = R_1 + jX_1$ es la resistencia y la reactancia de secuencia positiva del sistema
 $Z_0 = R_0 + jX_0$ es la resistencia y la reactancia de secuencia cero del sistema, con la consideración de $R_0 = R_1 = 0$, válida para muchos de los sistemas con sistemas de voltaje nominal de más o menos 110 kV, estas fórmulas se simplifican para esas consideraciones quedando:

fallas monofásicas

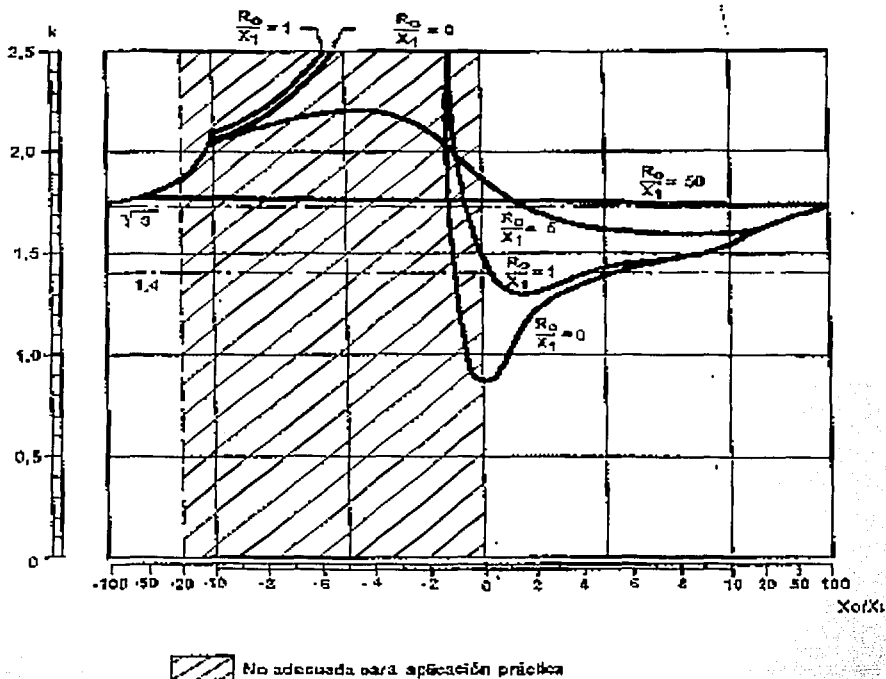
$$K_{30} = \sqrt{3} \left[\frac{(1 + X_0/X_1) + (X_0/X_1)^2}{2 + X_0/X_1} \right]$$

fallas bifásicas a tierra

$$K_{30} = \left[\frac{3X_0/X_1}{1 + 2X_0/X_1} \right] \quad (3)$$

La comparación entre los factores k_3 de falla a tierra del apartarrayos y K_{30} de falla monofásica o bifásica a tierra es importante, en sistemas sólidamente aterrizados se puede considerar que los dos factores son iguales; para sistemas con neutro aislado resonante, particularmente en grandes sistemas radiales o sistemas parcialmente divididos en sistemas mallados, el factor de falla a tierra K_3 es altamente dependiente de donde se localice la falla; en el extremo de un sistema radial los valores de K_3 son mayores que K_{30} , especialmente para sistemas monofásicos con fallas a tierra en el centro del sistema [27].

Los parámetros anteriores desde luego variarán dependiendo del tipo de aterrizamiento del sistema y de las relaciones R_0/X_1 y X_0/X_1 de las cuales la figura 3.3 ilustra algunas de ellas.



La Fig. 3.2 muestra los valores de K_{30} contra la relación X_0/X_1 con los parámetros R_0/X_1 para las consideraciones mencionadas. Referencia [19] IEC 71-1.

Algunos valores típicos de K_3 y la duración de las sobretensiones son:

SISTEMAS ATERRIZADOS

Sistemas mallados con potencia de corto circuito alta	$K_3 = 1.0$ a 1.4
Sistemas radiales con potencia de corto circuito baja	$K_3 = 1.0$ a 1.5
Sistemas aterrizados parcialmente o con baja impedancia	$K_3 = 1.0$ a 1.7

La duración de las sobretensiones es usualmente menor de 1 seg.

SISTEMAS RESONANTES CON NEUTRO ATERRIZADO:

Sistemas mallados	$K_3 = 1.73$
-------------------	--------------

Sistemas con líneas radiales largas:
 en los puntos de falla
 en ubicaciones distantes de la falla

$K_3 = 1.73$ a 1.8
 $K_3 = 1.73$ a 2.0

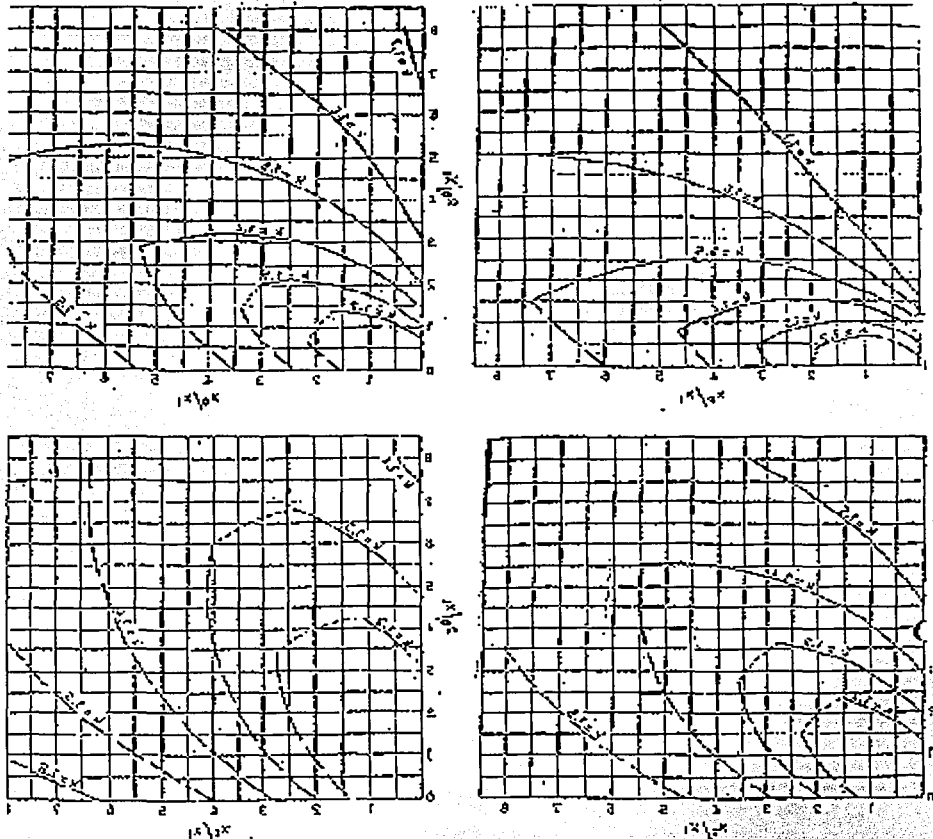


Fig. 3.3 Factores de aterrizamiento de sistemas para diferentes relaciones de R_0/X_1 y X_0/X_1 Referencia [18] CFEL0000-06

La duración de las sobretensiones puede ser mayor de 8 hs, en casos extremos 1 o 2 días.

SISTEMAS CON NEUTRO AISLADO:

Sistemas de distribución con líneas aéreas
 Sistemas industriales con cables

$K_3 = 1.73$ a 1.8
 $K_3 = 1.73$ a 1.8

La duración de las sobretensiones es:

Sistemas con falla a tierra liberada en líneas sobrecargadas 1 a 2 segs, fallas en barras 4 segs aproximadamente.

Sistemas sin falla a tierra liberada hasta 8 hs.

Es conveniente mencionar que en sistemas aterrizados partes de una red donde todas las conexiones del neutro son aisladas, pueden ser separadas de las otras del sistema durante períodos cortos, como es el caso de los transformadores sin conexión a tierra en el primario que son desconectados por el lado primario, manteniéndose energizados por el secundario temporalmente en los cuales $K3=1.73$.

Se acostumbra despreciar la resistencia de falla en los análisis correspondientes, tomando en cuenta que en el caso más desfavorable del valor de la resistencia de falla se tendría un efecto del orden del 6% en el factor de sobretension.

La impedancia de la fuente de sobretension es pequeña y la corriente a través del apartarrayos es determinada por el mismo, [3], [5], [18], [19], [22], [24], [27], [30], [34], [41], [42].

Cambios repentinos de carga por rechazos de carga

El caso más severo de este tipo de sobretensiones se presenta cuando se produce un rechazo o pérdida de carga, al abrirse el interruptor del extremo remoto de una línea de alta tensión (400 kV o más), de gran longitud (200 km. o más) conectada a una central generadora, por la que se transporta una parte sustancial de la energía suministrada a través de una subestación, la fig. 3.4a corresponde al diagrama unifilar de una línea de transmisión de 400 kV de 300 Km de longitud conectada a una estación elevadora de una central generadora con compensación capacitiva serie y reactiva paralelo; en la parte (b) se muestra la gráfica de comportamiento de la tensión con la carga, al producirse la apertura del interruptor del extremo remoto por una falla en la línea, como puede observarse el voltaje tiende a subir al disminuir la caída de potencial en la impedancia equivalente en serie del sistema y al producirse una aceleración de las máquinas en la planta generadora por la pérdida de la carga

Las gráficas de la fig3-4b nos muestran el comportamiento de la sobretensión de la línea sin compensación (1 y 1'), con 30% de compensación capacitiva serie y 50% de compensación reactiva en paralelo (3 y 3'), considerando una carga inicial de 33% del nivel de corto circuito del nodo de envío y un incremento de 10% de la velocidad despreciendo pérdidas [24].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

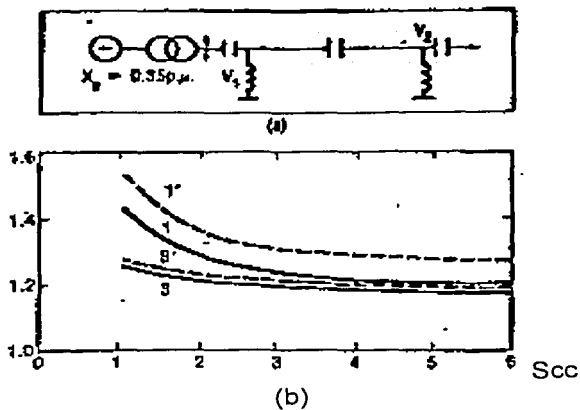


Fig. 3.4 Sobretensiones a frecuencia nominal por rechazo de carga de una línea de transmisión de 400 kV y 300 Km de longitud. Referencia [24]

Otros casos de rechazo de carga [27] se pueden presentar en los sistemas eléctricos, cuando de alguna manera se encuentran enlazados algunos circuitos entre el lado de la fuente y la carga, como generadores, transformadores, líneas de transmisión, etc. ligadas mediante interruptores en subestaciones; el factor de sobretensión K_1 para este evento puede obtenerse mediante la fórmula:

$$K_1 = [(1 + Q_L / S_{sc})^2 + (P_L / S_{sc})^2]^{1/2} \quad (4)$$

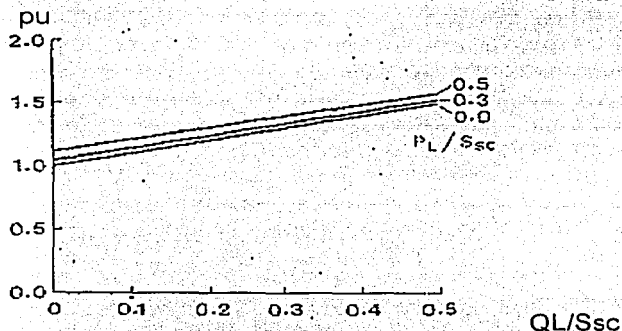


Fig. 3.5 Factor de sobretensión K_1 por rechazo de carga en un sistema, Referencia [27] Temporary overvoltages and their stresses on metal oxide surge arresters

donde S_{cc} es la potencia de corto circuito del sistema, P_L y Q_L representan la carga real y reactiva del mismo, la figura 3.5 muestra la relación existente entre el factor de sobretensión K_1 y Q_L/S_{cc}

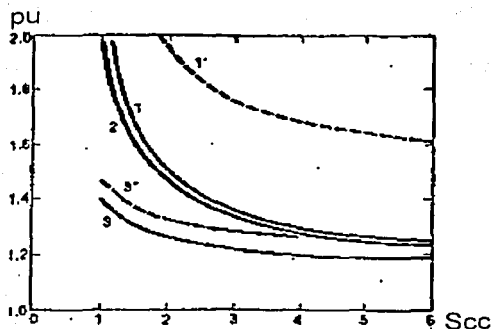


Fig. 3.6 Sobretensiones por rechazo de carga de una línea de transmisión de 400 kV y 600 km. de longitud. Referencia [24]

La fig. 3.6 representa el comportamiento de las sobretensiones por rechazo de carga de una línea del mismo voltaje (400 kV), pero ahora con mayor longitud (600 km.), sin compensación (1), con 50% de compensación capacitiva serie (2) y con 50% de compensación capacitiva serie y 70% de compensación inductiva paralelo para las mismas condiciones de carga [24].

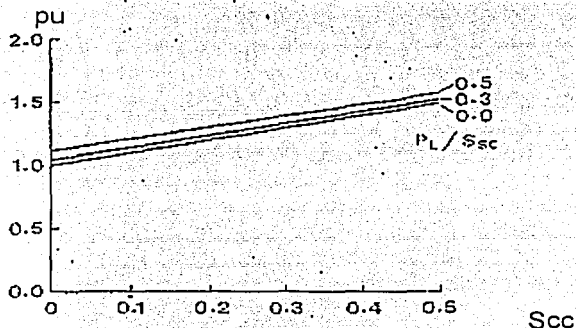


Fig. 3.7 Factor de sobretensión K_1 contra QL/S_{sc} para un rechazo de carga de un sistema. Referencia [27]

La fig. 3.7 muestra los valores de K_1 contra la relación QL/S_{sc} para el parámetro PL/S_{sc} , en la gráfica se puede observar que valores altos del factor de sobretensión K_1 corresponden a grandes relaciones QL/S_{sc} , o en particular, si son conectadas grandes cargas capacitivas en paralelo o circuitos filtros en el sistema alimentador; tomando en cuenta que en subestaciones con alta capacidad de corto circuito, la desconexión de líneas no representa un rechazo de carga, el factor de sobretensión es usualmente menor que $K_1 = 1.05$ [27].

En sistemas con baja potencia de cortocircuito y cargas altamente inductivas, tales como los grandes transformadores conectados al sistema en su primer paso de elevación de sobretensión, corresponderán factores de $k_1=1.15$; como esas sobretensiones temporales son relativamente bajas se presentan efectos de saturación que pueden requerir cálculos mas detallados para su solución.

Las sobretensiones temporales son obtenidas por la multiplicación de los factores y las tensiones de operación antes del rechazo de carga, si dichas tensiones de operación son consideradas igual al máximo voltaje del sistema, como cuando los transformadores se conectan al sistema, en particular cuando una carga plena de transformadores es desconectada después de una falla en las barras de una subestación.

La duración de las sobretensiones temporales puede ser del orden de 10 segundos o mayor, porque el voltaje puede ser disminuido a través de los cambiadores de derivaciones; las tres fases pueden ser esforzadas por los mismos sobretensiones.

La impedancia de la fuente para esas sobretensiones es pequeña y la corriente de los apartarrayos de óxido de metal, es determinada solamente por la característica de voltaje corriente, conforme la duración del fenómeno es larga la corriente será pequeña.

La sobretensión en los generadores está determinada por el nivel de corto circuito del sistema, la velocidad del generador, la respuesta del gobernador de velocidad-sistema de excitación, las características de la carga antes y después del evento, las longitudes y la cantidad de reactivos generados por las líneas conectadas, incluyendo los efectos de compensación serie o paralelo, así como la potencia producida por la maquina; se pueden lograr un cálculo preciso de las sobretensiones por rechazo de carga utilizando una simulación digital, que incluye las características dinámicas de las máquinas, sus sistemas de control, así como el modelado de las líneas y cargas; en pruebas de rechazo de carga en sistemas de potencia reales se han obtenido sobretensiones con magnitudes máximas de 1.45 pu.

Rechazos de carga en unidad generador-transformador

Los factores de sobretensión de unidades generadoras k_1 son influenciados fuertemente por el incremento del voltaje subtransitorio en la unidad generador-transformador; un posterior incremento de voltaje del orden del 5% originado por la respuesta del generador al paso de las condiciones subtransitorias a las transitorias, hasta que la acción del sistema de control reduce nuevamente a su valor especificado. Dicho incremento de voltaje de aproximadamente el 5% debe ser considerado durante los estudios de rechazo de carga, sobretodo cuando se presenten fenómenos de saturación.

Considerando la misma capacidad de corto circuito S_c para generador y transformador, el factor de sobretensión por rechazo de carga en condiciones de plena carga se obtiene de la siguiente expresión:

$$K_1 = 1.05 \sqrt{[1 + (X_d'' + U_k) \sin \varphi]^2 + [(X_d'' + U_k) \cos \varphi]^2} \quad (5)$$

que podemos reducir a:

$$K_1 = 1.05 [1 + (X_d'' + U_k) \sin \varphi] \quad (6)$$

Los valores típicos de factores de sobretensiones para generadores son:

En plantas de vapor con $\text{fp} = .8$

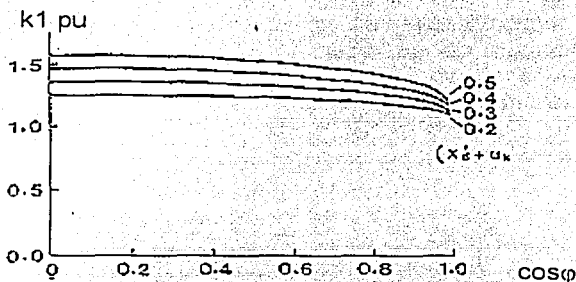
$k_1 = 1.1$ a 1.4

En plantas hidráulicas con $\text{fp} = 0$ a 1

$k_1 = 1.15$ a 1.5

La duración de estas sobretensiones son del orden de 1 segundo, por lo que el regulador de la unidad generador-transformador responde rápidamente.

También aquí la impedancia de la fuente es pequeña, por lo que los apartarrayos de óxidos de metal no son recomendables.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

fig. 3.8 Factor de sobretensión K_1 por rechazo de carga en unidades generador-transformador, Referencia [27].

Los valores exactos de los factores de sobretensión solo pueden ser calculados mediante programas de computadoras digitales o en analizadores de transitorios, tomando en cuenta las características de los transformadores y de los generadores incluyendo efectos de saturación, excitación y par mecánico, fig. 3.8. [1], [3], [18], [19], [22], [24], [27], [30], [34], [41], [42].

Capacitancias de líneas en vacío (efecto ferranti)

El efecto Ferranti ocurre debido a la corriente capacitiva producida por la carga de una línea de transmisión que fluye por la impedancia en serie, cuando se

abre el extremo remoto de una línea larga no compensada fig. 3.9; en estas condiciones el voltaje en el extremo receptor abierto E_R , es siempre mayor que el voltaje en el nodo de envío E_G , el voltaje senoidal en el extremo abierto esta dado por:

$$E_G = \frac{E_R}{\cos b_l} \quad (7)$$

en donde el factor $b = 7.2$ por cada 100 Km de línea a 60 Hz; el efecto Ferranti se puede reducir mediante compensación inductiva en paralelo o compensación capacitiva en serie.

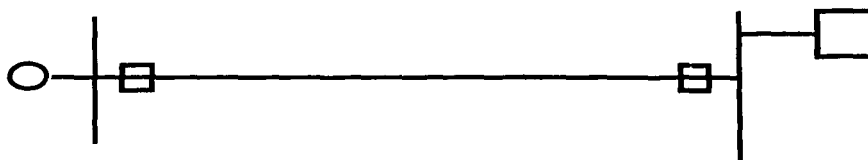


Fig. 3.9 Configuración de una línea de transmisión larga en la que se producen sobretensiones durante maniobras de energización o rechazo de carga.

Las capacitancias que actúan como carga en líneas en vacío pueden crear temporalmente sobretensiones después de su energización o después de cambios de carga, la fig. 3.10 muestra la magnitud de las sobretensiones debidas a efecto Ferranti en una línea de transmisión en vacío sin compensación (1), con 50% de compensación capacitiva serie (2) y con 50% de compensación capacitiva serie y 70% de compensación reactiva paralelo [24].

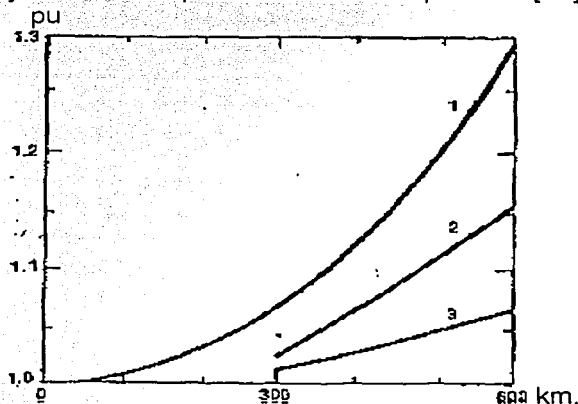


Fig. 3.10 Magnitud de las sobretensiones debidas al efecto Ferranti de una línea de 400 kV, 600 km. de longitud. Referencia [24].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Despreciando las pérdidas, los factores de sobretensión K2RE en el extremo receptor y K2GE en el extremo generador de la línea pueden ser calculados mediante las ecuaciones siguientes [27]:

$$K_{2RE} = \frac{1}{\left(\frac{Q_{SE} + Q_{RE}}{Q_{OL}} \frac{Q_{OL}}{S_{SC}} + 1\right) \cos \frac{\omega l}{v} - \frac{Q_{OL}}{S_{SC}} \frac{v}{\omega l} \left[1 - \left(\frac{S_{SC}}{Q_{OL}} + \frac{Q_{SE}}{Q_{OL}}\right) \frac{Q_{RE}}{Q_{OL}} \left(\frac{\omega l}{v}\right)^2\right] \operatorname{sen} \frac{\omega l}{v}} \quad (8)$$

$$K_{2SE} = \frac{\cos \frac{\omega l}{v} + \frac{\omega l}{v} \frac{Q_{RE}}{Q_{OL}} \operatorname{sen} \frac{\omega l}{v}}{\left(\frac{Q_{SE} + Q_{RE}}{Q_{OL}} \frac{Q_{OL}}{S_{SC}} + 1\right) \cos \frac{\omega l}{v} - \frac{Q_{OL}}{S_{SC}} \frac{v}{\omega l} \left[1 - \left(\frac{S_{SC}}{Q_{OL}} + \frac{Q_{SE}}{Q_{OL}}\right) \frac{Q_{RE}}{Q_{OL}} \left(\frac{\omega l}{v}\right)^2\right] \operatorname{sen} \frac{\omega l}{v}} \quad (9)$$

en donde:

$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ es la velocidad de propagación en secuencia positiva del sistema

$Q_{OL} = \omega L C_1 U_2^2$ es la potencia de carga capacitiva de la línea en secuencia positiva del sistema

$\omega = 2\pi f$ es la velocidad angular a la frecuencia del sistema.

con la consideración: $QR/2 = QSE = QRE$ que gráficamente muestra los valores de k2RE y k2SE contra la longitud de la línea L para diferentes grados de compensación QR/QOL con la relación QOL/SSC como parámetro [27].

Para líneas no compensadas de menos de 200 km. de longitud las fórmulas anteriores se reducen a:

$$K_2 = K_{2RE} = K_{2SE} = \frac{1}{1 - \frac{Q_{OL}}{S_{SC}}} \quad (10)$$

de acuerdo con la referencia 1 los valores típicos en los sistemas prácticos son los siguientes:

Sistemas con alto nivel de cortocircuito
Sistemas con bajo nivel de cortocircuito

K2 = 1.0, 1.1
K2 = 1.1, 1.2

Para líneas largas, con baja compensación, con valores altos de K2 es posible siempre compensarlos particularmente en el extremo receptor, si las tensiones son menores entonces K2 = 1.2 los efectos de saturación normalmente no son considerados, las tres fases tienen el mismo voltaje.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La formulación puede ser empleada para cables de potencia donde, la capacitancia C1 aplicable puede ser aproximadamente de 30 veces mientras que la inductancia L1 es de 0.3 veces los valores de las líneas largas [27].

La duración de estas sobretensiones puede ser del orden de 10 segundos porque tienen que ser reducidos por los cambiadores de derivaciones del transformador o si ellos son automáticos mediante un regulador de voltaje.

Generalmente la impedancia que limita la corriente a través del apartarrayos es pequeña y el apartarrayos no puede actuar eficazmente contra dichos sobretensiones; salvo cuando estos inciden en una corta longitud de circuitos de pequeña magnitud y un bajo nivel de corto circuito; la protección puede ser calculada si la duración del sobretension es pequeña; por lo tanto cada protección contra sobretensiones debe ser manejada solo después de una clara investigación de la disipación de potencia de los apartarrayos, [3], [18], [19], [22], [24], [27], [30].

RESONANCIA

Algunas de las sobretensiones de tipo temporal más severas ocurren debido a las condiciones de resonancia de una parte del sistema; en su forma más simple el circuito equivalente de un sistema resonante consiste de una fuente, un interruptor y un circuito RLC resonante; al operar el interruptor se producen sobretensiones de tipo temporal severas, por la transferencia de energía almacenada entre los campos magnético y eléctrico; despreciando las pérdidas, la sobretensión se puede aproximar:

$$V = i \sqrt{\frac{L}{C}}$$

En la práctica se pueden producir condiciones cercanas a la resonancia, un ejemplo es el caso de la apertura de una fuente de alta tensión que alimenta a un circuito de baja tensión por medio de un cable y un transformador, si la reactancia inductiva del transformador es cercana a la reactancia capacitiva del cable. Otro caso de resonancia es cuando las armónicas asociadas a la saturación de un transformador tienen frecuencias cercanas a la frecuencia natural del sistema, las sobretensiones debidas a resonancia pueden evitarse modificando la impedancia de los elementos del sistema, esta consideración debe formar parte de los criterios de diseño del mismo. Los efectos de resonancia pueden ser causados por fenómenos de saturación o por circuitos acoplados con frecuencias resonantes similares [27].

FENÓMENOS DE SATURACIÓN

Los sistemas con frecuencias de resonancia bajas, con baja potencia de corto circuito y altas cargas capacitivas, como cables o capacitores en paralelo, son propensos a sobretensiones temporales en todas las fases durante los fenómenos de resonancia, que se pueden presentar por energización de líneas, cables, transformadores, reactores, capacitores, etc. [27] fig. 3.11.

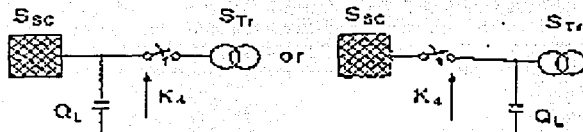


Fig. 3.11 Configuración básica para fenómenos de saturación durante la energización de grandes transformadores. Referencia [24].

Del análisis del origen de las tensiones temporales la relación Q_L/S_{sc} puede significar las siguientes condiciones:

$$\frac{Q_L}{S_{sc}} = \left(\frac{S_{Tr}}{S_{sc}} \frac{L_{Tr}}{L_s U_k} + 1 \right) \left(\frac{f_0}{f_r} \right)^2 \quad (12)$$

donde

S_{Tr} Potencia del transformador

U_k Impedancia de corto circuito del transformador en pu

L_s/L_{Tr} relación de inductancia a máxima saturación a la impedancia de corto circuito del transformador

f_0 frecuencia del sistema f_r frecuencia de las altas armónicas creadas por la saturación del transformador

En principio las sobretensiones resonantes con $K_4 = 2$ o 3 pueden ser causadas por la saturación de los transformadores cuando la relación f_r/f_0 es de alrededor de 7 [27]; siempre es posible limitar estas sobretensiones temporales con apartarrayos de óxidos metálicos, cuando la impedancia efectiva de la fuente puede ser comparativamente baja y la energía por absorber excede la capacidad de disipación del apartarrayos. otros efectos de esfuerzos en los apartarrayos pueden ocurrir cuando la relación:

$$\frac{S_{Tr}}{S_{sc}} = \frac{L_{Tr}}{L_s U_{ck}} \quad (13)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

es menor que 0.7 y si la frecuencia armónica no es mayor que $f_r/f_0 = 4$ en casos de saturación normal de transformadores a tensiones alrededor de 1.2 pu y para $f_r/f_0 = 4$,

en casos en que la saturación de los transformadores se presenta a tensiones muy bajas de alrededor de 1.05 pu.

Lo anterior implica que si las condiciones del sistema manifiestan estas características, deberán efectuarse investigaciones efectivas de la capacidad de disipación de energía y esfuerzos a que se verán sometidos los apartarrayos; dichas condiciones son:

a) relación de potencia STr del transformador a la potencia de corto circuito del sistema.

$$STr / Scc = 0.7 * (Ls / LTr) * Uk$$

con valores de:

$STr/Scc \geq 0.2$ paso bajo de transformador ($Ls/LTr=2$ a 2.5 ; $Uk=0.15$)

$STr/Scc \geq 0.1$ paso alto de transformador ($Ls/LTr=1$ a 1.3 ; $Uk=0.15$)

b) Relación de carga capacitiva QL a potencia de corto circuito Scc del sistema

$$\frac{QL}{Scc} \geq 1.7(f_o / fr)^2$$

con aproximadamente

$QL/Scc \geq 0.1$ para saturación a plena carga de transformador a 1.2 pu volts caso normal

$QL/Scc \geq 0.05$ para saturación a plena carga de transformador a 1.05 pu de voltaje en transformadores con grandes rangos de cambio de taps.

La duración de los esfuerzos por tal fenómeno de saturación es menor de 0.5 segs en la mayor parte de los casos, pero en casos extremos si las condiciones son propicias es posible alcanzar los 10 segs.

Un fenómeno similar de saturación puede ocurrir por energización de transformadores, si más de un transformador es energizado, la relación de potencias debe ser aumentada y la suma empleada en la fórmula correspondiente [27].

Circuitos acoplados

El fenómeno de resonancia puede ocurrir cuando la oscilación resultante de energizar una línea de transmisión, por el lado de alta tensión de un transformador, durante el cual la frecuencia es incrementada por una condición de resonancia, debida al eslabonamiento inductivo del transformador y la capacitancia en el lado de bajo voltaje, la frecuencia resonante de esta combinación es cercana a la de la línea de transmisión: condiciones de resonancia similares se

pueden presentar cuando se energiza un transformador sin carga a través de cables de energía por el lado de alta o baja tensión de un sistema, estos efectos son debidos al acoplamiento de los dos circuitos oscilantes con aproximadamente la misma frecuencia resonante, fig. 3.12.

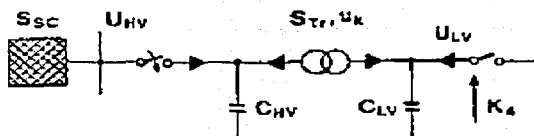
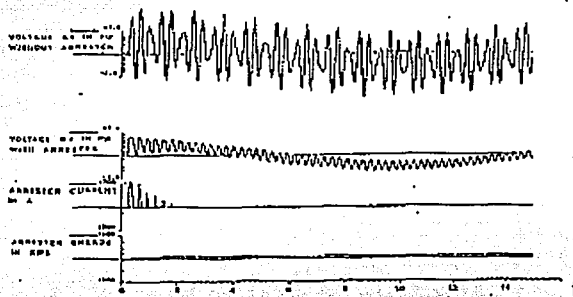


Fig. 3.12 Configuración básica para resonancia de circuitos acoplados, Referencia [24]

El fenómeno de resonancia puede ocurrir si la frecuencia de resonancia del circuito primario consistente en una capacitancia en el lado de alto voltaje y la inductancia de corto circuito de la red alimentadora, dada por la potencia de corto circuito de suministro S_{sc} correspondiente a la frecuencia de resonancia del circuito acoplado secundario, constituido por la capacitancia del cable de bajo voltaje y la inductancia de eslabonamiento del transformador dado por S_{Tr} y U_k .

La fig. 3.13 muestra un ejemplo de cada fenómeno de circuitos acoplados, la gráfica superior muestra el sobretension en el lado de baja tensión sin apartarrayos; la segunda gráfica muestra que un apartarrayos de óxido de metal en el mismo lado de baja tensión disminuye dicho sobretension notablemente; las gráficas inferiores muestran la corriente relevante del apartarrayos y la energía absorbida.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 3.13 Sobretensión temporal por ferorresonancia debido a maniobra en el lado de baja tensión de un transformador de potencia sin y con apartarrayos, Referencia [24]

Aunque sin apartarrayos los factores de sobretensión en el lado de bajo voltaje de circuitos acoplados sin carga, pueden tomar valores entre 3 y 5; los apartarrayos de óxidos metálicos reducen estos a valores menos severos, los apartarrayos pueden ser sometidos a grandes esfuerzos durante dichos eventos, solo si la capacitancia total del lado de baja tensión en vacío es menor de algunos

microfaradios para tensiones del sistema entre 123 y 145 kV o de algunas décimas de microfaradios para sistemas de media tensión; como dichos valores no son usuales para configuraciones de sistemas prácticos, los esfuerzos de los apartarrayos causados por tales fenómenos de resonancia en circuitos acoplados, pueden no ser tomados en cuenta y el apartarrayos puede ser usado para esta aplicación.

Si diferentes efectos para sobretensiones temporales coinciden al mismo tiempo, el factor de sobretensión total puede obtenerse como el producto de los factores independientes, por ejemplo si una falla a tierra ocurre inmediatamente después de un rechazo de carga, el factor de sobretensión total correspondiente al voltaje de fase a tierra a la frecuencia del sistema es igual al producto de los factores K_1 de rechazo de carga y K_3 de falla de fase a tierra que, por lo tanto, puede ser el aplicable a la parte del sistema sujeto a la sobretensión por rechazo de carga.

También una falla a tierra después de una energización de líneas en vacío, da lugar a sobretensiones de fase a tierra iguales al producto de los dos factores de los dos eventos; cuando existen eventos simultáneos, los dos factores deben ser aplicados a la misma localidad.

La consideración de un evento consistente en tres eventos simples, tales como una falla a tierra después de un rechazo de carga en el extremo de una línea larga, puede resultar en el producto de tres factores simples.

Por lo tanto junto a la baja probabilidad de dichos eventos, el factor de sobretensión actual puede no ser tan alto como los valores máximos obtenidos para los eventos simples.

La duración de las sobretensiones temporales obtenidas por los factores combinados es obtenida de las duraciones de los eventos correspondientes, esto puede conducir a sobretensiones temporales altas durante períodos de tiempo cortos y bajas con períodos de tiempo mayores.

Este tipo de sobretensiones ferromagnéticas ocurre cuando un elemento magnético saturable del sistema es excitado por una capacitancia, ésta puede representar al capacitor de graduación entre los contactos abiertos de un interruptor, o la capacitancia a tierra de un cable etc.

Este fenómeno puede producirse también cuando solamente una o dos fases de un sistema se encuentran energizadas debido a la operación de fusibles o interruptores fig. 3.14; el elemento saturable puede representar transformadores de potencial con reactancias altas conectadas al bus abierto o bien, en transformadores con terciario conectados en alta tensión y que a su vez alimentan transformadores de servicios auxiliares.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

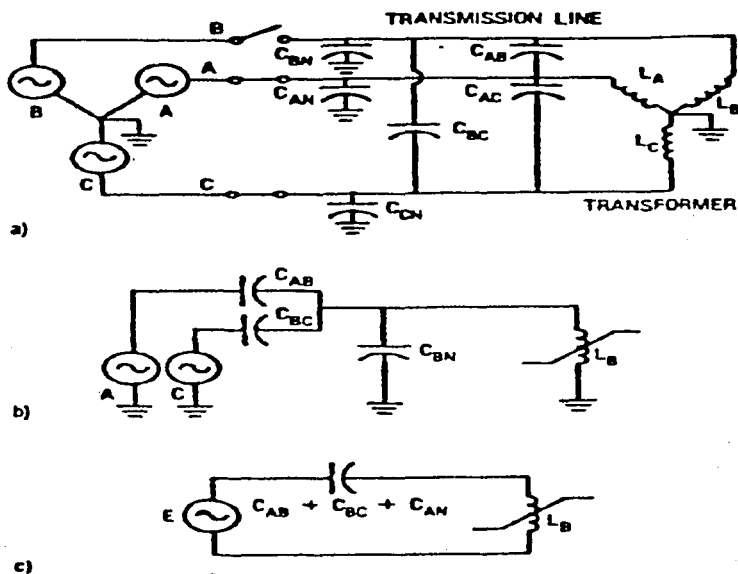


Fig. 3.14 Circuito trifásico con fase "b" abierta, sujeto a ferorresonancia: a) representación trifásica, b) y c) circuitos equivalentes. Referencia [24].

La sobretensión en las terminales depende de la magnitud y forma de onda de la corriente que fluye por el elemento magnético, a su vez, esta corriente depende del estado magnético del elemento, al entrar y salir éste de la región de saturación fig. 3.14, su inductancia efectiva cambia, dando como resultando tensiones con multitud de armónicas; estas tensiones pueden presentar componentes con frecuencias mayores o menores a la frecuencia de operación del sistema fig. 3.15, diversos estudios efectuados en analizadores de transitorios muestran que existe mayor posibilidad de que se presente ferorresonancia en sistemas en los que la reactancia capacitiva equivalente sea menor a 20 veces la reactancia inductiva $X_c < 20X_L$, las sobretensiones por ferorresonancia se pueden controlar operando los transformadores a una densidad de flujo reducida, también se pueden implementar procedimientos de maniobras que eviten energizar transformadores o reactores sin carga a través de elementos capacitivos [1], [3], [5], [8], [9], [14], [19], [24], [27], [30], [34], [41], [42].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

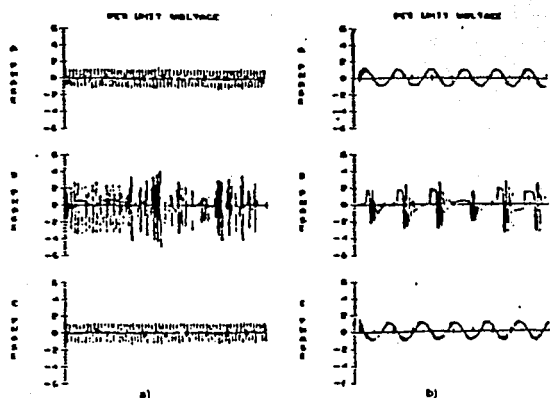
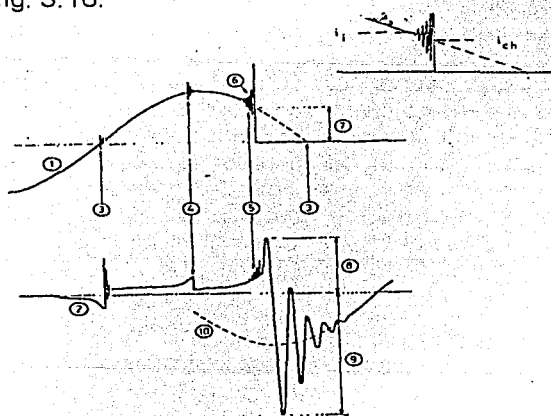


Fig. 3.15 Tensiones resonantes producidas por la apertura de la fase B a escalas 100 ms/div y 10 ms/div respectivamente. Referencia [24]

Corte de pequeñas corrientes inductivas

El arco que se forma entre los contactos de un interruptor durante una apertura en un sistema con carga inductiva, se encuentra sujeto a inestabilidades conforme la corriente que fluye por él tiende a cero, estas se presentan en forma de oscilaciones en la corriente y el voltaje entre los contactos del interruptor, si dicha inestabilidad es seguida de una repentina caída de la corriente a cero, se produce un fenómeno que se conoce como corte prematuro de una pequeña corriente inductiva fig. 3.16.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 3.16 Corriente y voltaje del arco entre los contactos de un interruptor, en el caso de interrupción prematura de corriente, Referencia [24].

En el modelo más simplificado del arco, suponemos que la transición entre un estado y otro se realiza de modo exponencial con una cierta constante de tiempo, despreciando las inductancias del lado de la carga y del lado de la fuente L_s y L_c , obtenemos un circuito equivalente formado por dos ramas: una contiene una inductancia L_a en serie con una resistencia R_i , la segunda incluye una capacitancia C en paralelo con una resistencia R_a , C es la capacitancia equivalente de C_s y C_c en serie mostradas en las fig. 2.1 y 2.7.

De la solución de la ecuación diferencial del circuito equivalente obtenemos una expresión para la corriente en el arco, la condición para que se produzca inestabilidad se da cuando el factor exponencial es creciente; lo anterior resulta en una relación entre la corriente de corte (i_{ch}) y la raíz cuadrada de la capacitancia equivalente (C), en la que está involucrado un factor que depende del tipo de interruptor; para una capacitancia típica de $C=10$ nf. los valores de esta corriente son:

tipo de interruptor	i_{ch} corte
pequeño volumen de aceite	7 a 10 A
hexafluoruro de azúfre SF6	4 a 17 A
aire comprimido	15 a 20 A

La sobretensión general del lado de la carga, una vez ocurrido el corte prematuro de la corriente, depende de los valores de la corriente de corte, L_c y C_c , la energía almacenada en estos elementos antes del corte, se convierte en energía electrostática; haciendo un balance de energía, se puede obtener la siguiente fórmula para el factor de la sobretensión.

$$E_a = [1 + (i_{ch} / U_0)(L_c / C_s)]^{1/2} * h_m$$

donde U_0 es el voltaje pico de operación del sistema y h_m es la eficiencia magnética en el sistema, y toma valores entre 0.3 y 0.5.

Maniobras en circuitos capacitivos

Consideremos un circuito sencillo formado por una carga capacitiva alimentada por una fuente inductiva, cuya corriente en la carga está adelantada al voltaje en 90° ; cuando se interrumpe la corriente al llegar a cero, el voltaje del sistema se encuentra en un valor cercano al máximo, el voltaje de recuperación transitoria en el interruptor es muy pequeño, por lo que no ocurre reignición del arco, y la carga capacitiva queda cargada al voltaje pico de operación del sistema, al pasar medio ciclo el voltaje de recuperación llegara al doble del voltaje pico del sistema $2p_u$; si en ese momento ocurre una reignición del arco en el interruptor, despreciando las pérdidas, el voltaje en el capacitor podría subir hasta $3 p_u$. al interrumpirse de nuevo el circuito, el capacitor queda cargado a $3p_u$, repitiéndose el ciclo indefinidamente [24].

En un sistema trifásico este fenómeno es más complejo, particularmente si uno de los interruptores opera antes que los otros dos, las mayores sobretensiones ocurren cuando solo una de las fases abre y su valor depende de la relación entre la capacitancia de secuencia cero del sistema. [2], [3], [13], [15], [17], [19], [20], [22], [24], [27], [30].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 4.- MODELADO DE SOBRETENSIONES EN EL EMTP

Los estudios de análisis de transitorios de los sistemas eléctricos se llevan a cabo mediante el auxilio de la computadora digital, a través de la aplicación de las técnicas y desarrollos apropiados.

La computadora electrónica analógica (TNA) fue el primer antecedente de este tipo, que se aplicó a la solución de problemas que involucraban circuitos eléctricos representados por ecuaciones diferenciales; es un analizador de transitorios en redes eléctricas, está constituido por modelos de transformadores, líneas de transmisión y distribución, cables de energía, capacitores, reactores, cargas, apartarrayos [3], etc., con características ajustables; el modelo de la red se construye mediante la interconexión de los elementos que la constituyen.

El TNA no solo se aplicó a los estudios de transitorios, sino además, a los casos de estado estable como los estudios de flujos de potencia, análisis de sistemas, análisis de fallas, estudios de comportamiento de la estabilidad de los sistemas, etc.

La computadora digital tiene la virtud de la realización de procesos de datos en forma sistemática y rápida, una red eléctrica en estado transitorio se puede representar mediante sistemas de ecuaciones diferenciales y resolver con gran rapidez, mediante métodos de integración numérica que describirán las características de operación de la red a través de sus corrientes de malla y rama, de sus tensiones de nodos y las potencias activa y reactiva.

La computadora es muy apropiada para almacenar información, recuperarla, manejarla y mantener rutinas, conformar operaciones de matrices, etc., debido a lo cual su potencial fue aprovechado para desarrollar el prodigio de los desarrollos digitales de análisis de los sistemas de potencia denominado Electromagnetic Transient Program (EMTP).

El (EMTP) es un programa para computadora usado para simulación de transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de control en sistemas eléctricos de potencia polifásicos, que permite calcular variables de interés en el comportamiento de las redes eléctricas durante condiciones de estado estable y transitorio; fue el primer desarrollo trascendente, entre muchos otros, que sustituyó la computadora analógica por la digital, desarrollado a finales de los años setenta por el Dr. Herman Dommel, quien lo llevó a la agencia del departamento de energía de los Estados Unidos "Bonneville Power Administration", en donde bajo su dirección fue expandido, distribuido y algunos modelos creados, o desarrollados y utilizados por casi dos décadas por el sector productivo, las universidades y centros de investigación, a través de quienes se ha logrado enriquecer su contenido extraordinariamente.

Los grupos formales originales de usuarios del EMTP fueron los países de Japón, Estados Unidos y algunos países de Europa, quienes publicaban frecuentemente artículos relacionados con este programa; actualmente prácticamente en todo el mundo se cuenta con alguna versión de este documento, sobretodo en las instituciones de nivel superior y centros de investigación.

La administración de este documento se ha dividido en dos versiones la primera designada como ATP (Alternative Transient Program), que es una de las versiones más ampliamente usadas del Electromagnetic Transients Program EMTP en el mundo y la segunda EMTP administrada por un grupo de coordinación para su desarrollo denominado DCG y EPRI (Electric Power Research Institute) [16]; las regiones de ATP organizadas en el mundo son: Australia, Canadá y Estados Unidos, Europa, India, Japón y Latinoamérica.

Los principales estudios involucrados con el uso del EMTP, tienen objetivos que caen en dos categorías generales: el diseño el cual incluye coordinación de aislamiento, equipo de medición y control, especificación de dispositivos de protección, etc., y la solución de problemas en estado estable o transitorio; algunos de los estudios típicos son las sobretensiones por descargas atmosféricas o maniobra de interruptores, los cierres determinísticos y probabilísticos, el cierre o recierre monopolar, alta velocidad de cierre, conexión y desconexión de capacitores, tensión transitoria de recuperación, tensiones inducidas, subestaciones recibiendo ondas de sobretensiones; coordinación de aislamiento de líneas aéreas, subestaciones intemperie y aisladas con gas, tensión torsional en flecha de máquinas rotatorias, resonancia subsíncrona, transmisión en corriente directa, compensación estática de potencia reactiva, presencia de armónicas, fenómenos de ferorresonancia, sistemas de tierra, etc., [4].

Una de las mayores ventajas del EMTP es la flexibilidad en el modelado de los sistemas, ya que en el uso del programa tenemos una amplia variedad de estudios, en que el usuario define el sistema a ser simulado, mediante la construcción de los componentes de los modelos, etc.; en el caso presente se empleará para el análisis de algunos casos de sobretensiones con algunas variantes, con los cuales ilustraremos el comportamiento de los sistemas eléctricos ante diferentes eventos típicos de sobretensiones entre los que mencionamos [3], [4], [16], [22], [31], [34], [44], a continuación los siguientes:

- Sobretensión por maniobra de energización de una línea de transmisión larga.
- Sobretensión por la energización de la misma línea de transmisión conectada a un transformador de potencia sin carga,
- Sobretensión por la energización de bancos de capacitores.
- Sobretensión por descarga atmosférica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CASO1.- ENERGIZACIÓN DE UNA LÍNEA DE EXTRAALTA TENSIÓN 400 KV EN VACÍO MEDIANTE CIERRES ESTADÍSTICOS Y DETERMINÍSTICOS, SIN RESISTENCIAS DE PREINSERSIÓN, CON RESISTENCIAS DE PREINSERSIÓN Y CON APARTARRAYOS

En el dimensionamiento de los aislamientos de las líneas de transmisión se deben tomar en cuenta las sobretensiones transitorias por maniobras de interruptores, ya que estos eventos tienen una muy alta probabilidad de ocurrencia y representaría un elevado riesgo para la preservación del equipo no considerarlas como parte del diseño.

Debido a que es realmente difícil determinar la combinación de los parámetros que producirían esta máxima sobretensión a través de los métodos de análisis convencionales, es usual realizar simulaciones de una determinada cantidad de operaciones de maniobra de interruptor con diferentes tiempos de cierre, y en algunos casos con variación de algunos otros de sus parámetros, con objeto de establecer una distribución estadística de los transitorios correspondientes.

La información de carácter probabilístico de operaciones de interruptores de líneas de transmisión de alta tensión se obtiene mediante las técnicas de aplicación de cierres estadísticos; a través de la información obtenida por este proceso, es posible realizar una adecuada coordinación de aislamiento de líneas de transmisión y del equipo eléctrico asociado con estas y con las subestaciones.

El EMTP cuenta con los elementos que permiten simular una serie de interruptores especiales para correr un gran número de casos, en los cuales los tiempos de apertura o cierre son variados automáticamente, de tal manera que la salida incluye distribuciones estadísticas de la sobretensión con frecuencia acumulativa.

Existen básicamente dos tipos de elementos, uno en el que los tipos de cierre son variados estadísticamente y el otro en el cual las variaciones son de tipo sistemático; en la representación del comportamiento real del interruptor del circuito es difícil determinar el nivel de aproximación que alcanzan estas variaciones [3].

Cierres estadísticos

Antes de que los contactos de un interruptor hayan alcanzado el cierre completamente, puede ocurrir que una descarga se presente en el espacio

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

existente entre dichos contactos, creando un cierre eléctrico ligeramente adelantado respecto al cierre mecánico correspondiente.

El tiempo de cierre estadístico T de cada interruptor estadístico puede ser simulado, variando aleatoriamente ya sea de acuerdo a una distribución uniforme o conforme a una distribución Gausiana, en la que se especifica el tiempo medio de cierre T y la desviación estándar σ , después de cierta variación para todos los interruptores; el caso vuelve a correrse para obtener las sobretensiones pico, adicionalmente a las variaciones del tiempo de cierre de cada interruptor podrá añadirse un retraso individual, que seguirá una distribución uniforme.

Los interruptores estadísticos también pueden ser utilizados para realizar aperturas aleatorias en lugar de cierres [16], pero esta opción es menos importante; en simulaciones realísticas la interrupción de la corriente únicamente ocurre en el paso de primer cero de corriente después del tiempo de operación, y habrá únicamente unas pocas combinaciones de secuencias de fase en las cuales los tres polos de un circuito trifásico puedan interrumpir, en algunos casos puede ser más fácil simular estas combinaciones directamente, en lugar de estadísticamente.

Parámetros estadísticos

Un interruptor de circuito cierra los tres polos aparentemente al mismo tiempo, sin embargo, debido a probables retrasos en el mecanismo de cierre y posibles reencendidos eléctricos, el tiempo de cierre real difiere del punto esperado, existiendo un tiempo entre el cierre del primero y el último de los polos que se conoce como espaciado de polos.

Los tiempos de cierre de un polo pueden ser representados por una distribución normal, el valor medio de la distribución es el punto esperado; si la distribución es terminada en $+3\sigma$ y -3σ , el espacio polar del interruptor de circuito será igual a 6 veces la desviación estándar de distribución, [23].

La relación de la desviación de los tiempos de cierre del punto de referencia, con respecto a la tensión transitoria a la frecuencia del sistema, es también una variable aleatoria, la magnitud de las sobretensiones por maniobra de interruptor dependen de la tensión a la frecuencia del sistema en el tiempo de cierre del contacto.

Un retraso adicional el cual es definido como el ángulo de referencia, es aplicado igualmente a todas las maniobras estadísticas del interruptor, el retraso aleatorio siempre sigue una distribución uniforme con parámetros especificados, los ángulos de referencia de 0 a 360° toman en cuenta

todas las tensiones posibles a la frecuencia del sistema en el instante de cierre del contacto; este dato está incluido en la tercera tarjeta de datos misceláneos.

Mediante la aplicación de la rutina de cierres estadísticos se obtendrá la información de carácter probabilístico correspondiente a las sobretensiones que pueden ocurrir durante la maniobra del interruptor; dicha información hace posible lograr una adecuada coordinación de aislamiento de las líneas de transmisión y subestaciones, así como la de su equipo eléctrico asociado y conocer las alternativas existentes para disminuir los efectos de la magnitud de las sobretensiones transitorias originadas por las maniobras de los interruptores[34], entre las cuales las más usuales son las siguientes:

- a) Maniobra de interruptor sincronizando.
- b) Maniobra mediante interruptores con resistencias de preinserción.
- c) Aplicación de apartarrayos en los equipos asociados a los interruptores.

Caso a.- La realización de la primera prueba se llevó a cabo para una línea de transmisión de 400 kV, con 271 Km. de longitud y tres conductores de 1113 KCM por fase, que se conecta al bus de una subestación a través de un interruptor convencional, mediante la primera alternativa de maniobra de interruptor sincronizando, aplicando la técnica de cierres estadísticos mostrada en el archivo de datos de cierres estadísticos CESTAD.DAT, empleando el diagrama unifilar de la fig. 4.1. que como observamos cuenta con resistencias de preinserción como se indica en el diagrama de conexiones.

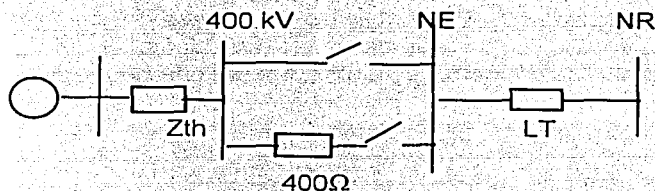


Fig. 4.1 Representación de un sistema de transmisión eléctrica en 400 kv.

Como el objetivo es conocer el comportamiento de la sobretensión durante la maniobra de cierre del interruptor para los tres casos a, b y c previstos, este primero se logrará mediante el cierre del interruptor ubicado en la parte superior de la figura, y el archivo de datos correspondiente se muestra en la hoja anexa.

Cierres determinísticos

La técnica de cierres determinísticos consiste en realizar simulaciones de un gran número de cierres del interruptor, con diferentes tiempos

de cierre y en algunos casos con variación de algunos otros parámetros que afecten a este fenómeno, con objeto de obtener una distribución estadística de transitorios de sobretensiones por maniobra de interruptor.

El programa EMTP cuenta con interruptores especiales para correr un gran número de casos en los cuales los tiempos de apertura o cierre pueden ser sistemáticamente variados; la salida incluye distribuciones estadísticas de sobretensiones con frecuencia acumulativa; en unos casos los tiempos de cierre son variados estadísticamente y en otros son variados sistemáticamente [3].

Caso b.- La segunda prueba se llevó a cabo para la misma línea de transmisión de 400 kv., con 271 Km. de longitud y tres conductores de 1113 KCM por fase, conectada al bus de una subestación a través de un interruptor con resistencias de preinserción; en este caso aplicamos la técnica de simulación mediante cierres determinísticos, incluyendo en el archivo de datos las resistencias de preinserción mostradas en el diagrama unifilar de conexiones, energizado en este caso por la rama inferior del diagrama; el archivo de datos y los resultados y gráficas de la simulación obtenidos se muestran en las figuras anexas.

Caso c.- La tercera prueba para la misma línea de transmisión de 400 kv., con 271 Km. de longitud y tres conductores de 1113 KCM por fase conectada al bus de una subestación a través de un interruptor convencional sin resistencias de preinserción y con apartarrayos en el extremo de la línea, fig. 4.2; se aplicó la misma técnica de simulación del caso (b), pero retirando las resistencias de preinserción e incluyendo apartarrayos en los extremos de la línea de transmisión; para lo cual se requirió modificar el archivo de datos en ese mismo sentido, para mantener la continuidad como lo muestra el diagrama unifilar de conexiones siguiente:

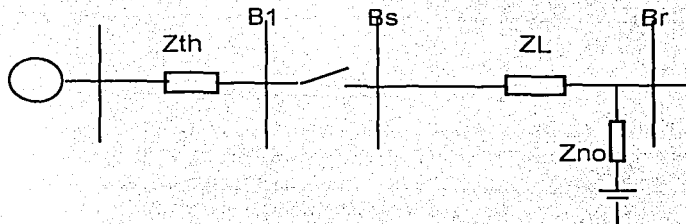


Fig. 4.2 Representación de un sistema de transmisión eléctrica en 400 kV. con apartarrayos en un extremo de la línea.

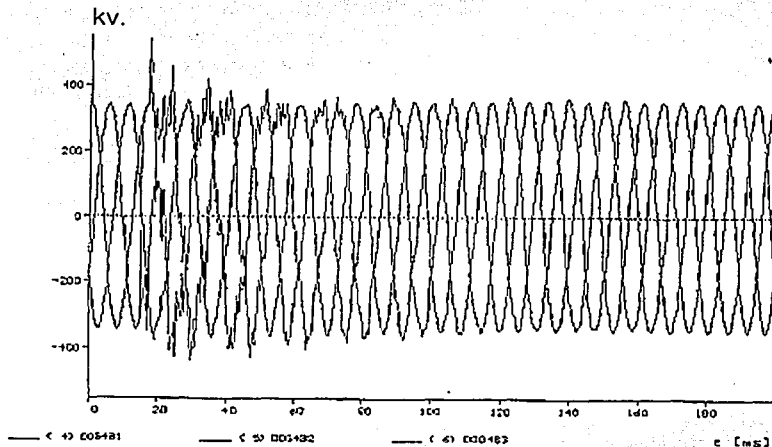
El archivo de datos y los resultados y gráficas obtenidos se muestran en las hojas anexas.

Consideraciones del Caso 1

Las figuras 4.3 a 4.6 nos muestran el resultado gráfico de la simulación de la maniobra de cierre del interruptor, para la energización de la línea de transmisión de 400 kv. en vacío, sin apartarrayos, mediante el uso de un interruptor convencional, Caso 1a.

En la gráfica de la figura 4.3 observamos que el cierre se realiza después de los quince milisegundos, momento en el que se inicia la energización de la línea en forma transitoria alcanzando en la subestación de envío cerca de los 600 kV. en las tres fases, permaneciendo la tensión prácticamente distorsionada durante 120 ms, después de lo cual recupera el valor de la tensión original casi sin distorsión.

Como observamos antes de los primeros 15 milisegundos en que no se ha cerrado el interruptor en la gráfica existe tensión en las tres fases debido a que este registro corresponde a la estación de envío, en donde se tienen energizadas las barras antes de conectar la línea.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 4.3 sobretensión por energización de una línea de transmisión de 400 kv., 1113 KCM, 271 Km.; técnica de cierres estadísticos, nodo de envío.

La figura 4.4 nos muestra el comportamiento de la tensión en las tres fases de la misma línea en el extremo receptor, en donde, como observamos, la perturbación es mayor y más drástica, debido al efecto capacitivo de la línea; manteniéndose la distorsión casi durante todo el periodo de prueba (200 ms), después del cual, la tensión se estabiliza.

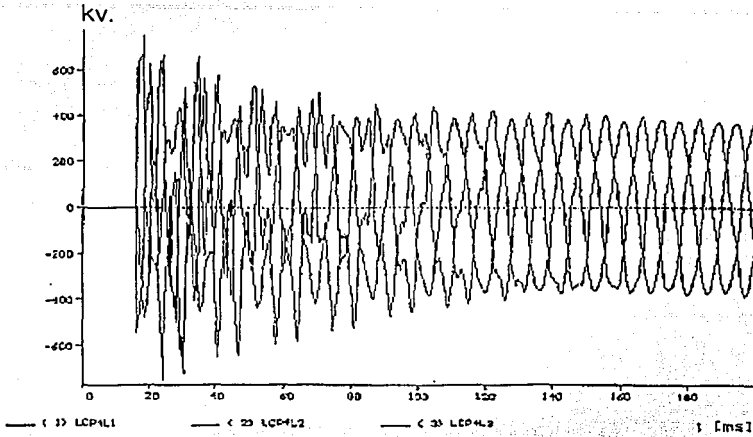


Fig. 4.4 Sobretensión por energización de una línea de transmisión de 400 kv., 1113 KCM, 271 Km., técnica de cierres estadísticos, nodo receptor.

Como se observa, a diferencia del caso anterior, no aparece tensión antes de los primeros 15 milisegundos ya que la línea esta desconectada en el extremo de envío desde donde se energiza la línea, iniciándose la distorsión a partir del cierre del interruptor quince milisegundos después de iniciada la prueba.

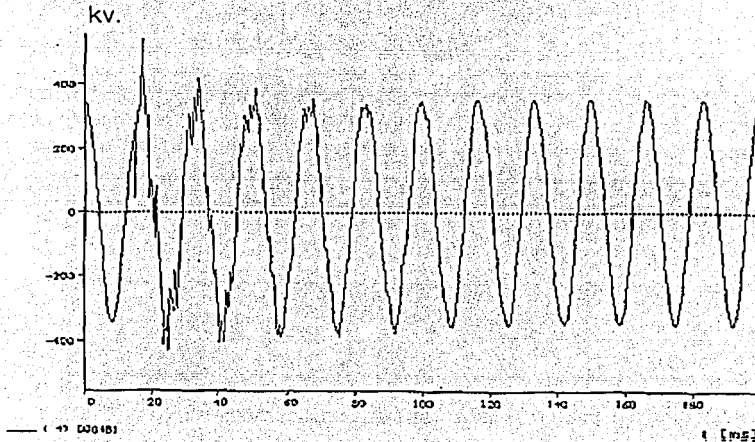


Fig. 4.5 Sobretensión por energización de una línea de transmisión de 400 kv., 1113 KCM, 271 Km., técnica de cierres estadísticos, fase 1 nodo transmisor.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las figuras 4.5 y 4.6 nos muestran los mismos casos, graficando en ambas únicamente los voltajes de una fase en las barras en las subestaciones de envío y recepción, para mayor claridad de los efectos producidos.

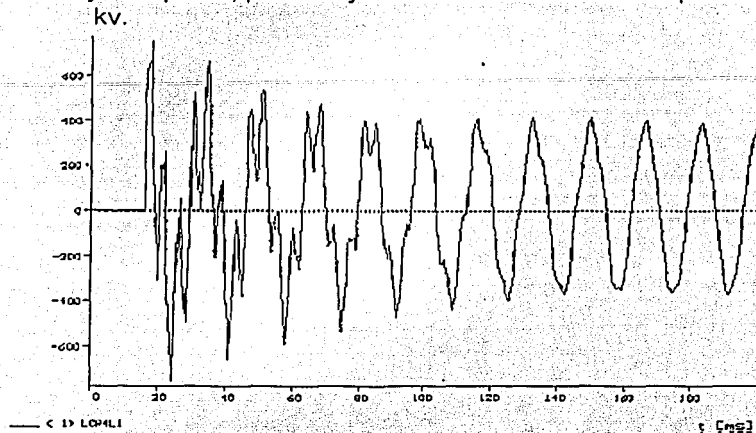
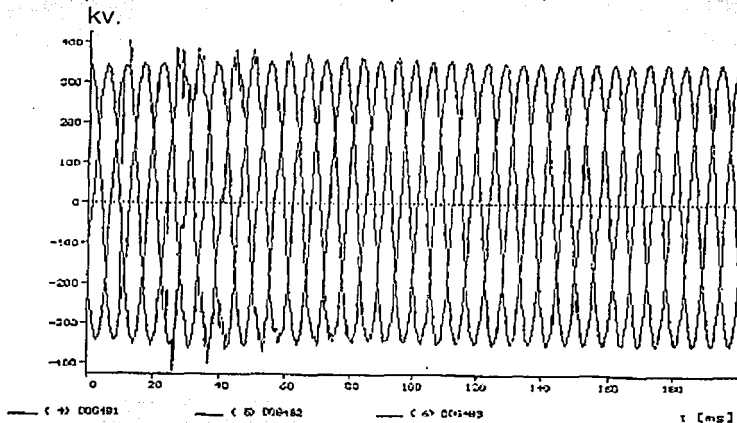


Fig. 4.6 Sobretensión por energización de una línea de transmisión de 400 kv., 1113 KCM, 271 Km., técnica de cierres estadísticos, fase 1 nodo receptor.

Las figuras 4.7 y 4.8 nos muestran el resultado gráfico de la simulación de la maniobra de cierre del interruptor, para la energización de la línea de transmisión de 400 kv. en vacío y sin apartarrayos, mediante el uso de un interruptor con resistencias de preinserción, caso 1b.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 4.7 Energización de una línea de transmisión de 400 kv., 1113 KCM, 271 Km., con resistencias de preinserción, cierres determinísticos; nodo de envío.

La figura 4.7 corresponde a la energización de la línea pero ahora considerando el empleo de interruptores con resistencias de preinserción caso 1b, el resultado mostrado en la gráfica corresponde al registro en el nodo de envío, observamos que durante los primeros quince milisegundos la onda no está distorsionada, ya que no se ha iniciado la operación del interruptor; a los quince milisegundos en que se lleva a cabo la maniobra del interruptor se inicia el transitorio, pero ahora amortiguado por las resistencias de preinserción con que cuenta el interruptor, lo cual se manifiesta en la reducción del valor de la sobretensión, que solo alcanza escasamente los 400 kv. en este nodo, amortiguándose la distorsión prácticamente en los primeros 100 milisegundos.

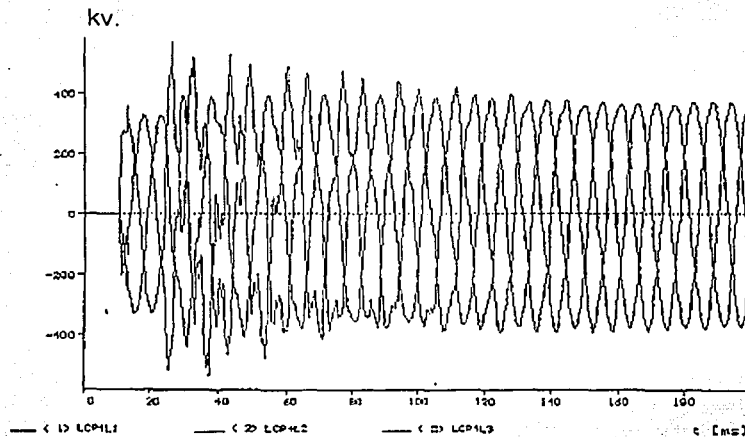


Fig. 4.8 Energización de una línea de transmisión de 400 kv., 1113 KCM, 271 Km., con resistencias de preinserción, cierres determinísticos; nodo receptor

La figura 4.8 corresponde a la energización de la misma línea considerando el empleo de interruptores con resistencias de preinserción, el resultado mostrado en la gráfica corresponde al registro en el nodo de recepción, en la que observamos que durante los primeros quince milisegundos no existe señal de tensión ya que al no estar aún conectado el interruptor, la línea y su nodo no están energizados.

A los quince milisegundos en que se lleva a cabo la maniobra del interruptor se inicia el transitorio, pero ahora amortiguado por las resistencias de preinserción con que cuenta el interruptor, lo cual se manifiesta en la reducción del valor de la sobretensión que solo alcanza escasamente los 500 kv. en el nodo receptor, amortiguándose la distorsión prácticamente en los primeros 100 milisegundos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Nuevamente en esta gráfica observamos la elevada distorsión en el nodo de recepción respecto al nodo de envío, sin embargo la máxima elevación de potencial no alcanza los 600 kV, debido nuevamente a las resistencias de preinserción existentes en el interruptor con el que se efectúa la maniobra; la atenuación de la distorsión alcanza en este nodo un poco más de los 120 milisegundos del nodo de envío.

Las figuras 4.9 y 4.10 nos muestran el resultado gráfico de la simulación de la maniobra de cierre del interruptor, para la energización de la línea de transmisión de 400 kV, en vacío y con apartarrayos en los extremos de la línea de transmisión, mediante el uso de un interruptor convencional, caso 1c.

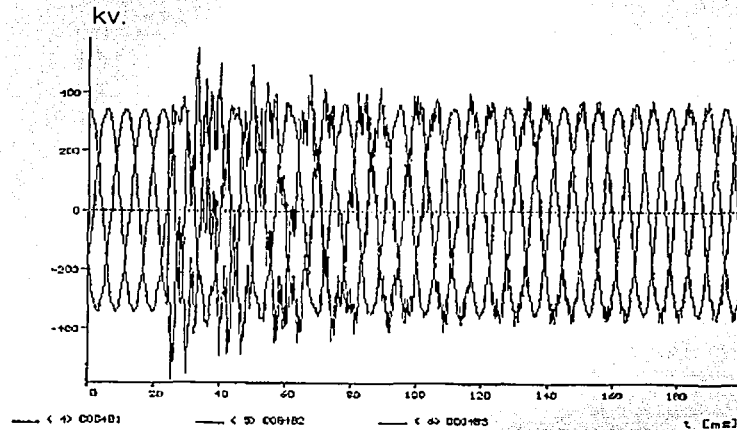


Fig. 4.9 Energización de una línea de transmisión de 400 kv., 1113 KCM, 271 Km., con apartarrayos en sus extremos, cierres determinísticos; nodo de envío

La figura 4.9 corresponde a la energización de la misma línea considerando un interruptor sin resistencias de preinserción, pero con el empleo de apartarrayos de óxido de zinc en los extremos de la línea; el resultado de esta simulación, que se muestra en la gráfica, corresponde al registro en el nodo de envío, observamos que durante los primeros veinticuatro milisegundos la línea no está energizada; después de este tiempo en que se realiza la operación del interruptor a los veinticuatro milisegundos se inicia el transitorio, pero ahora atenuado por los apartarrayos conectados en los extremos de la línea, lo cual se manifiesta en la reducción del valor de la sobretensión que como observamos casi alcanza los 600 kv. pero con mayor distorsión que en el caso anterior, permaneciendo la distorsión prácticamente los 200 milisegundos.

La figura 4.10 nos muestra el comportamiento de la tensión en las tres fases en el extremo receptor, en el que como observamos no hay tensión hasta

que no se conecta el interruptor, en este caso 24 milisegundos después de iniciada la simulación; adicionalmente observamos que la perturbación es muy similar a la que se presenta en el nodo de envío, debido a la existencia de los apartarrayos en los dos extremos, pero más drástica que la que existe cuando se emplean interruptores con resistencias de preinserción, también en este caso la distorsión se mantiene casi durante todo el periodo de prueba (200 ms).

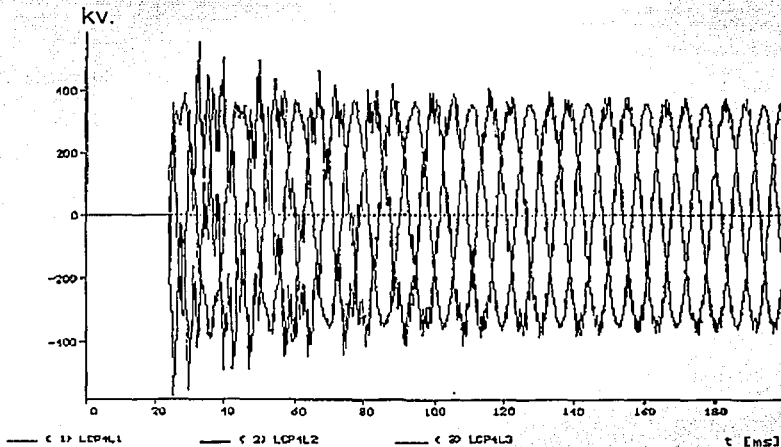


Fig. 4.10 Energización de una línea de transmisión de 400 kV, 1113 KCM, 271 Km., con apartarrayos en sus extremos, cierres determinísticos; nodo receptor

Es fácil observar de una manera general de las gráficas de los tres casos analizados, de maniobra de interruptor para energizar una línea de transmisión larga, que el segundo de ellos es el más recomendable; ya que requiere menor inversión, se resuelve prácticamente sin adición de equipo, requiere un mínimo de mantenimiento y es la que logra la mínima distorsión de la onda y por lo tanto la que menos somete a sobretensiones al equipo; [3], [12], [13], [16], [17], [19], [20].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CASO 2.- ENERGIZACIÓN DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA EN VACIO A TRAVÉS DE UNA LÍNEA DE EXTRA-ALTATENSIÓN, 400 KV

Se analizará el comportamiento de la tensión de una línea de transmisión larga, que por su naturaleza es capacitiva, cuando en el extremo opuesto al punto de energización se cuenta con un transformador de potencia sin carga, el cual representa un efecto inductivo que obviamente tenderá a compensar el efecto de la línea tratada en el primer caso.

Este caso corresponde al de una subestación alimentadora de una área de control, o el lado de alta tensión de la subestación elevadora de una planta generadora; en la cual es conveniente coordinar las acciones de operación con el uso de recursos propios, para el control de la sobretensiones producidas por la operación del sistema; entre las cuales se encuentran los propios recursos del sistema: transformadores, los interruptores con resistencias de preinserción y los apartarrayos para atenuar las sobretensiones, la fig. 4.11 muestra el diagrama unifilar de conexiones correspondiente:

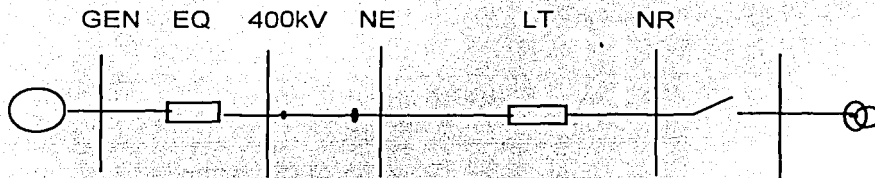


Fig. 4.11 Diagrama unifilar de conexiones del circuito correspondiente a la energización de un transformador de potencia

Consideraciones del Caso 2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las figuras 4.12 y 4.14 nos muestran gráficamente los resultados de la simulación del cierre de un interruptor, para la energización de un transformador a través de una línea de transmisión larga mostrada en el diagrama unifilar de la figura 4.11.

La figura 4.12 muestra la energización de la línea de transmisión del lado de alta tensión del autotransformador de 300 MVA, 400-230 kv. sin carga, incluso sin energizar al autotransformador, empleando un interruptor sin resistencias de preinserción y sin la instalación de apartarrayos en los extremos de la línea; el resultado de esta simulación se muestra en la gráfica de la figura 4.12 y corresponde al registro en el nodo de recepción de la línea, en la que

observamos que desde el inicio hasta el final de la simulación existe una sobretensión severamente distorsionada en el nodo receptor, que alcanza un valor máximo de aproximadamente 2 pu; que se atenúa en 100ms [45].

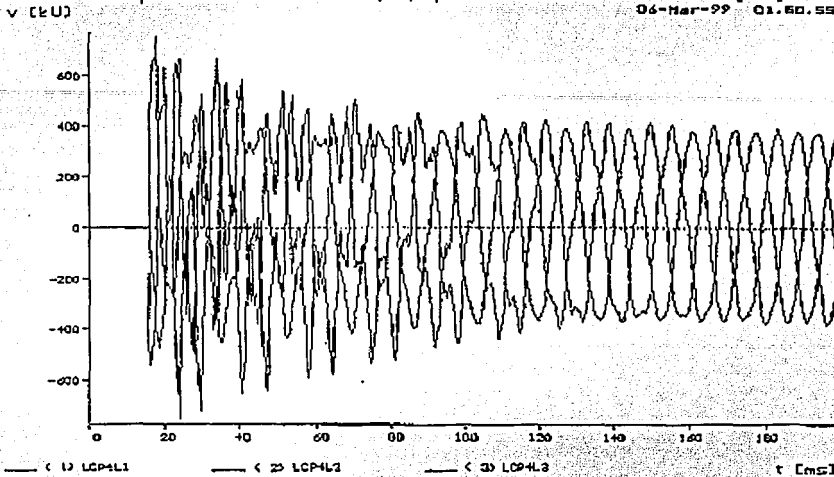


Fig. 4.12 Sobretensión en el extremo receptor de una línea de transmisión en vacío.

Posteriormente al energizar la línea y el transformador simultáneamente, lo cual se observa en la gráfica de la figura 4.13, la sobretensión se reduce aproximadamente 50% en las terminales del transformador, atenuándose y manteniéndose en este rango en el nodo de recepción; esta reducción de tensión que se observa en las gráficas correspondientes; indica como habíamos previsto que para estos casos no necesariamente se requiere el empleo de atenuadores de sobretensión por maniobras de interruptor, aun en las líneas de extraalta tensión, como las resistencias de preinserción en los interruptores o la instalación de los apartarrayos en los extremos de las líneas de transmisión; desde luego involucrando en el proceso el equipo adecuado y llevando a cabo dichas maniobras desde los lugares y en el orden requerido, con lo cual el equipo no sufrirá el deterioro producido por las sobretensiones y lo más importante no requerirá las costosas inversiones adicionales, de los elementos de atenuación de las sobretensiones.

Como observamos en los resultados del análisis de las gráficas de la figura 4.12 a 4.14 obtenidas de la simulación, las sobretensiones presentadas durante la maniobra del interruptor de 400 kv., en la energización de un transformador de potencia a través de una línea de transmisión larga, no son tan severas si se efectúan con ambos, línea de transmisión y transformador interconectados; aunque desde luego podrá ser requerido un modesto sistema de

atenuación contra las pequeñas sobretensiones que pudieran presentarse para cada caso particular, que dependerá de las características propias de los equipos

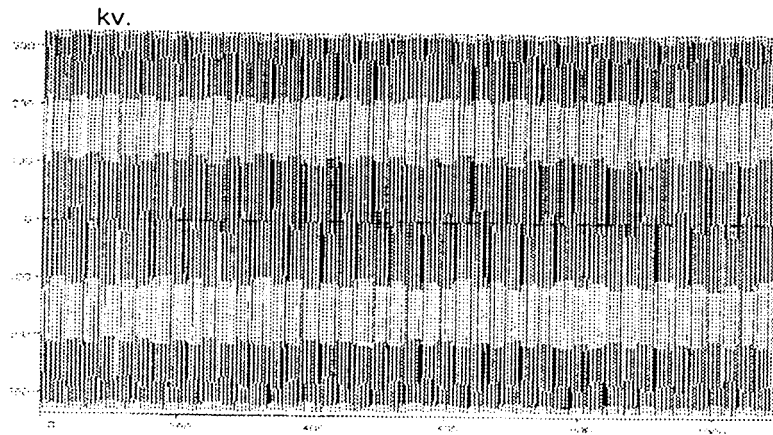


Fig. 4.13 Energización de un autotransformador de 300 MVA, 400-230 kv. sin carga a través de una línea de transmisión, terminales del transformador.

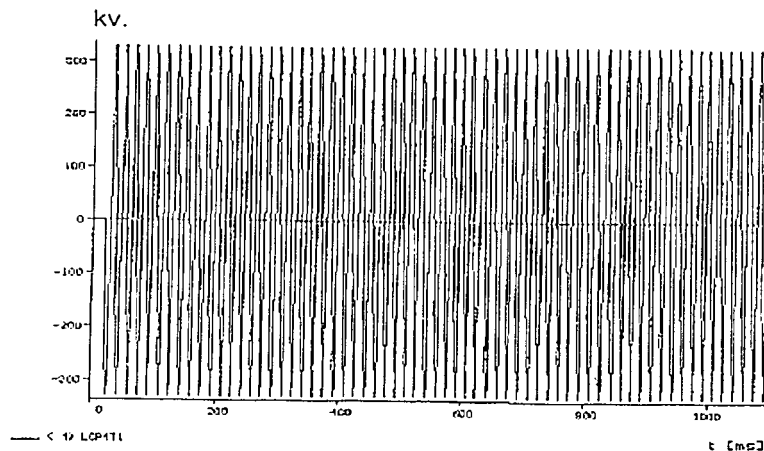


Fig. 4.14 Energización de un autotransformador de 300 MVA, 400-230 kv. sin carga a través de una línea de transmisión, terminales del transformador, fase 1.

La gráfica de la figura 4.14 muestra el resultado de la simulación de la energización del transformador a través de una línea de transmisión larga, en la cual observamos mas claramente el comportamiento de la tensión de la fase 1 del lado de alta tensión del transformador; en la gráfica se muestra que para las condiciones de prueba la tensión se mantiene uniforme durante todo el periodo de simulación, debido al efecto combinado de la línea de transmisión y el transformador; [3],[4], [12], [15], [16], [17], [19], [20], [22], [33], [44], [45].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CASO 3.- ENERGIZACION DE BANCOS DE CAPACITORES EN PARALELO

Los bancos de capacitores son elementos de compensación de potencia reactiva de los sistemas eléctricos, su empleo es necesario sobretodo en las momentos de variación de los máximos y mínimos de la demanda, su aplicación es importante en los siguientes casos:

- Soporte de tensión de redes de transmisión y subtransmisión.
- Corrección del factor de potencia de redes de distribución.

Las corrientes y tensiones que se presentan al energizar un circuito se pueden analizar mediante la figura 4.15 siguiente, que nos representa el circuito de Thevenin de un sistema durante el cierre de un banco de capacitores.

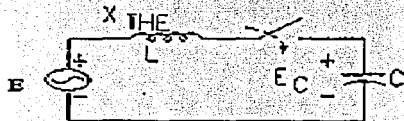


Fig. 4.15 Sistema eléctrico energizando un banco de capacitores.

en donde la tensión en las terminales del capacitor es dada por la ecuación:

$$V_c = \frac{1}{C} \int i dt$$

Determinación de la corriente transitoria

La ecuación de equilibrio del sistema es:

$$L \frac{di}{dt} + V_c = E \quad (1)$$

de donde

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = E \quad (2)$$

diferenciando la ecuación (2)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{i}{C} = 0$$

aplicando la transformada de Laplace

$$S^2 Li(s) - SLi(0) - Li'(0) + \frac{i(s)}{C} = 0$$

De la ecuación (1) tenemos:

$$i'(t) = \frac{di}{dt} = \frac{E - V_c}{L} \Rightarrow Li'(0) = E - V_c(0)$$

$$S^2 Li(s) - SLi(0) + V_c(0) + \frac{i(s)}{C} = E$$

$$i(s) \left[S^2 + \frac{1}{LC} \right] = \frac{E - V_c(0)}{L} + SLi(0)$$

$$i(s) = \frac{E - V_c(0)}{L} \frac{1}{S^2 + \left(\frac{1}{LC} \right)} + Li(0) \frac{S}{S^2 + \left(\frac{1}{LC} \right)}$$

Suponiendo que: $I(0)=0$; $V_c(0)=0$; banco descargado inicialmente, y considerando que:

$$1/LC = \omega_0^2$$

entonces:

$$i(s) = E \left(\frac{C}{L} \right)^{1/2} \frac{\omega_0}{S^2 + \omega_0^2}$$

por lo que:

$$i(t) = E \left(\frac{C}{L} \right)^{1/2} \text{sen } \omega_0 t$$

lo cual manifiesta que la corriente transitoria oscila senoidalmente a la frecuencia natural del sistema.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \text{ rad/seg} \Rightarrow \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

también:

$$\left(\frac{C}{L}\right)^{1/2} = \frac{1}{z_0} \Rightarrow z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Z_0 : es la impedancia característica del sistema.

Para un circuito de corriente alterna para el cual la tensión de excitación es alterna la corriente que se establece cuando el circuito se energiza es:

$$i(t) = \frac{V_0}{Z_0} \text{sen } \omega_0 t$$

de donde:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DEL CAPACITOR

$$L \frac{di}{dt} + V_C = E; \quad i = C \frac{dV_C}{dt} \Rightarrow \frac{di}{dt} = C \frac{d^2 V_C}{dt^2}$$

$$LC \frac{d^2 V_C}{dt^2} + V_C = E$$

$$\frac{d^2 V_C}{dt^2} + \frac{V_C}{LC} = \frac{E}{LC}$$

$$\frac{d^2 V_C}{dt^2} + \omega_0^2 V_C = \omega_0^2 E$$

$$S^2 V_C(s) - S V_C(0) - V_C'(0) + \omega_0^2 V_C(s) = \omega_0^2 \frac{E}{S}$$

$$(S^2 + \omega_0^2) V_C(s) = \omega_0^2 \frac{E}{S} + S V_C(0) + V_C'(0)$$

$$\text{Si } V_C'(0) = 0$$

$$i(0) = 0$$

$$\frac{dCV_c(0)}{dt} = V'_c(0) = \frac{I_c(0)}{C}$$

$$V'_c(0) = 0$$

$$V_c(S) = \frac{Ew_0^2}{S(S^2 + w_0^2)} + \frac{V_c(0)S}{S^2 + w_0^2}$$

$$V_c(S) = \frac{E}{S} \frac{w_0^2}{S^2 + w_0^2} + \frac{V_c(0)S}{S^2 + w_0^2}$$

$$V_c(t) = E(1 - \cos w_0 t) + V_c(0) \cos w_0 t$$

$$V_c(t) = E - [E - V_c(0)] \cos w_0 t$$

Los factores que participan en la energización de los bancos de capacitores son de diversos tipos y dependen fundamentalmente del número de unidades consideradas:

a) un solo banco de capacitores.

-Impedancia del sistema.

-Magnitud de la onda de tensión al cerrar el interruptor.

-Condiciones del estado de carga del banco.

-Modulación de las cargas.

-Modelación de las impedancias del equipo de la subestación

b) dos bancos de capacitores uno después de otro (espalda con espalda)

-Impedancia del sistema

-Magnitud de la tensión al cerrar el interruptor.

-Inductancia equivalente entre los dos bancos de capacitores, (reactores en serie e impedancias del equipo de la subestación.

-Capacitancia equivalente de los dos bancos

-Modelación de las cargas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ENERGIZACION DE BANCOS DE CAPACITORES

Al instante de la energización de un banco de capacitores que está descargado se comporta como si se tuviera un corto circuito, después del tiempo en que el banco se carga a la tensión del sistema, la frecuencia de la oscilación, la cual dependerá de la capacitancia del banco y de la impedancia del sistema eléctrico y su capacidad de corto circuito, variará en el rango de 400 y 1000 Hz para un solo banco.

Si después del primer banco se intenta energizar un segundo banco, al energizar el segundo banco se presentarán altas corrientes de arranque y altas frecuencias de oscilación, que producirán graves efectos que deben ser tomados en cuenta durante la selección de los interruptores.

DESENERGIZACION DE BANCOS DE CAPACITORES

Durante la desenergización de los bancos de capacitores operando en forma independiente se producen sobretensiones transitorias de recuperación sobre los interruptores, que si al conectar se alcanzan valores de 2.0 pu estando descargados, desconectando se alcanzan hasta 2.5 y 3 pu sin reignición [3].

La figura 4.16 siguiente muestra el diagrama de un banco de capacitores único



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 4.16 Sistema eléctrico representado por su circuito equivalente de Thevenin energizando un banco de capacitores

La corriente durante la maniobra de cierre será función de la siguiente expresión:

$$I_{pico} = (E_s - E_c) * \sqrt{C/L}$$

y la frecuencia:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

En donde E_s y E_c son valores instantáneos y el valor de la resistencia se desprecia, la corriente "inrush" y la frecuencia de oscilación son limitados por la impedancia del sistema.

Cuando la energización se lleva a cabo con carga atrapada en el capacitor, con polaridad opuesta a la de la fuente de alimentación, la corriente pico de inrush puede ser significativamente más alta.

Durante los estudios electromagnéticos de bancos de capacitores aislados, las impedancias de las barras, conductores, herrajes, contactos, etc., son omitidas, debido a que su magnitud es despreciable comparada con la impedancia del sistema.

ENERGIZACIÓN DE DOS BANCOS DE CAPACITORES INTERCONECTADOS

No es poco común encontrar más de un banco de capacitores conectados a un mismo juego de barras, y en este caso es muy frecuente que la interconexión de los mismos se haga uno a continuación de otro, por lo que es interesante conocer el comportamiento de este evento.

Consideremos un sistema constituido por dos bancos de capacitores en paralelo representado por el circuito equivalente, el cual nos muestra la fuente de alimentación, los propios bancos de capacitores conectados en paralelo, la inductancia y la resistencia equivalentes de las barras y cables de los bancos de capacitores mostrados en la figura 4.17 siguiente:

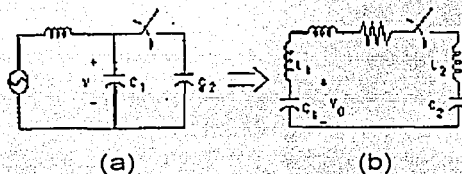


Fig.-4.17 Circuito equivalente simplificado y de detalle de un sistema formado por dos bancos de capacitores en paralelo

En el detalle del circuito equivalente de la parte (b) L_1 y L_2 representan las inductancias propias de los bancos de capacitores, L_3 y R_3 la impedancia de las barras y cables entre los bancos de capacitores.

Cuando un banco de capacitores es energizado con otro en paralelo que ya se encuentra en servicio, entre los bancos se presentan elevadas corrientes transitorias, que aunque usualmente no contienen suficiente energía para causar daño al equipo de alta tensión (transformadores, apartarrayos, etc.), puede causar interferencia en las comunicaciones y hacer operar en falso las protecciones o los fusibles con la consiguiente desconexión de bancos de transformadores; la corriente y la frecuencia se obtienen de:

$$I_{pico} = (V_0) \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_{eq}}}; \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}}}$$

Por lo que la inductancia equivalente del sistema será:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3$$

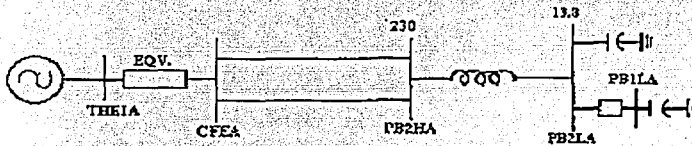
y la capacitancia equivalente:

$$C_{eq} = \frac{C1 * C2}{C1 + C2}$$

Cuando el segundo banco de capacitores C2 se energiza con el banco C1 ya conectado la energía almacenada en C1 es transferida a C2, creándose corrientes de "inrush" de alta magnitud y frecuencia; lo cual también se presenta efectuando la maniobra inversa:

La magnitud de la corriente y la frecuencia producidas solo se limitarán por la impedancia existente entre los bancos de capacitores.

La simulación para la energización de bancos de capacitores se llevará a cabo con dos bancos de capacitores de 6 y 9 MVAR, conectados a unas barras de 13.8 kv. de un sistema eléctrico mostrado en la figura 4.18 siguiente:



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 4.18 Bancos de capacitores del bus de distribución de un sistema eléctrico

La fig. 4.18 nos muestra un sistema eléctrico representado por su equivalente de Thevenin en 230 kv., conectado a través de dos líneas de transmisión a una subestación de distribución 230-13.8 kv., en la cual se encuentran conectados dos bancos de capacitores en el bus de 13.8 kv.

El objetivo de la simulación es determinar el método óptimo para limitar las sobretensiones por maniobras de apertura y cierre de los interruptores de los bancos de 6 y 9 MVAR, para lo cual se simularán todas las alternativas de cierre de los bancos uno después de otro, incluyendo la impedancia separadora de los bancos de capacitores descrita antes.

La figura 4.19 muestra el diagrama unifilar del sistema representado por el circuito equivalente de Thevenin del sistema de suministro en 230 kv.,

energizando las barras de 230 kV. de una subestación de distribución de 230-13.8 kV. a través de dos líneas de subtransmisión de 230 kV.

Las barras de 13.8 kV. de la subestación de distribución conectadas al secundario del transformador de distribución, están seccionadas mediante una impedancia limitadora de corriente y frecuencia de inrush, entre los dos bancos de capacitores conectados a dichas barras.

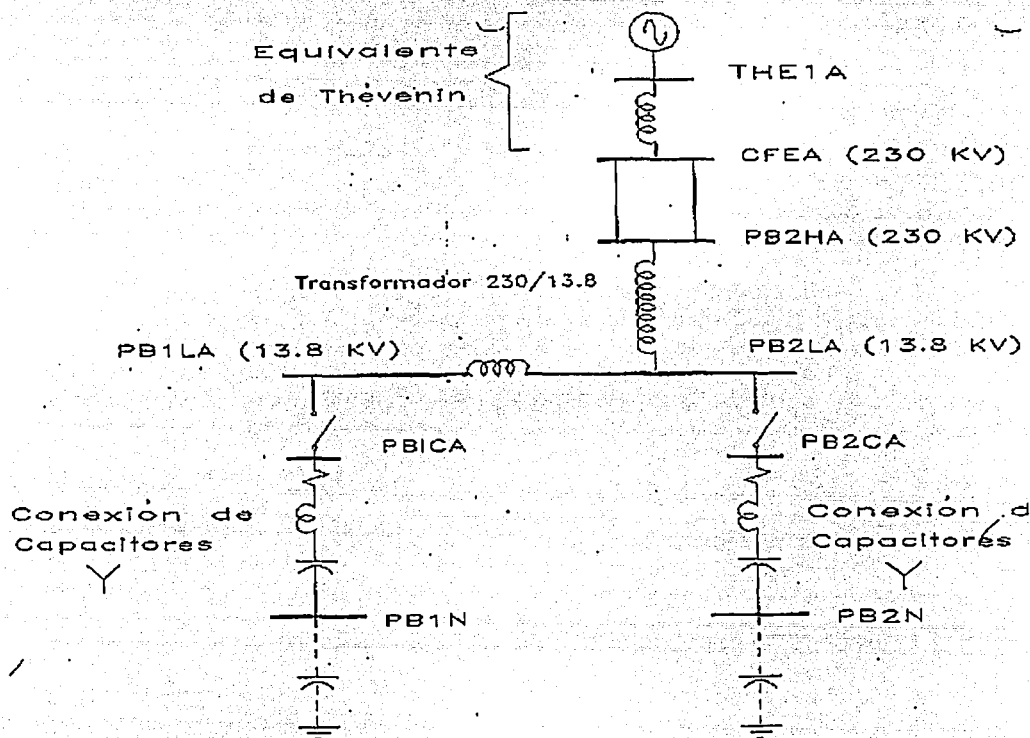
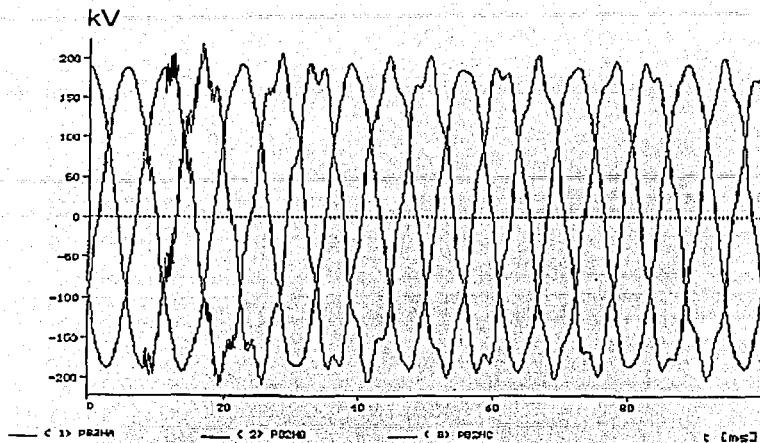


Fig. 4.18 Diagrama unifilar de bancos de capacitores conectados a una misma barra del secundario de un transformador de 230-13.8 kV.

Consideraciones Caso 3

Las figuras 4.19 a 4.21 muestran los resultados de la simulación del cierre de un interruptor de un banco de capacitores de 9 MVAR a un nodo de distribución de 13.8 kV de una subestación de distribución de 230-13.8 kV alimentada por un sistema eléctrico de potencia.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 4.19 Energización de un banco de capacitores de 13.8 kV, desde el nodo de 230 kV de un transformador.

La figura anterior muestra la variación de la tensión de las tres fases en el lado de 230 kV de un banco de transformadores, atenuada por la impedancia del transformador, durante la energización del banco de capacitores de 9 MVAR instalado en su bus de distribución de 13.8 kV; el cierre del interruptor se realiza después de 5.5 milisegundos a partir del cual se manifiesta la sobretensión de una onda de tensión sensiblemente distorsionada durante los siguientes 15 milisegundos, y que se va atenuando con el tiempo, pero que prácticamente permanece durante el periodo de simulación de 100 milisegundos deformada.

Como en los casos anteriores observamos que durante el tiempo que el interruptor del banco de capacitores no se conecta, la onda de tensión permanece estable.

La figura 4.20 muestra la variación de la tensión de las tres fases en el nodo de 13.8 kV, durante la energización de un banco de capacitores de 9 MVAR instalado en su bus de distribución; el cierre del interruptor se realiza después de 5.5 milisegundos a partir del cual se manifiesta la distorsión de la onda de tensión, que como se observa es más severa que la que se mostró para el lado de 230 kV del sistema; asimismo se puede observar que la distorsión alcanza valores prácticamente del doble de la tensión del nodo de (13.8 kV) manteniéndose la distorsión prácticamente todo el tiempo de simulación con muy ligera atenuación.

Como en los casos anteriores observamos que durante el tiempo que el interruptor del banco de capacitores no se conecta, la onda de tensión permanece estable,

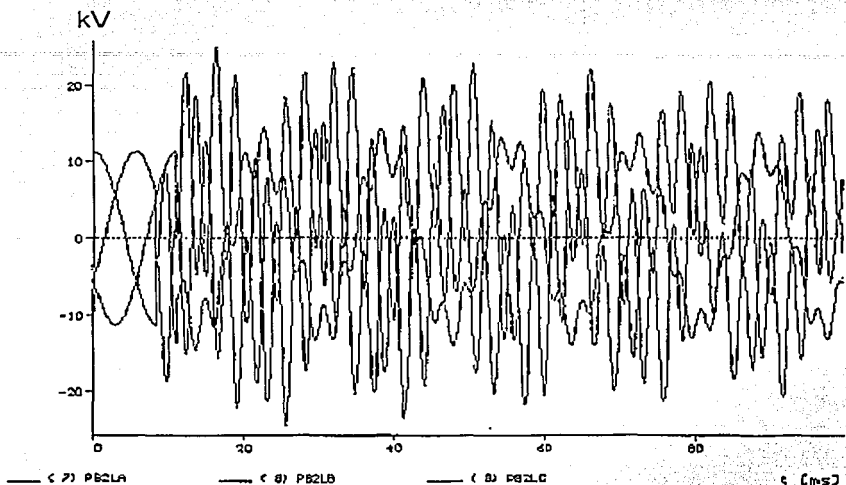


Fig. 4.20 Energización de banco de capacitores de 13.8 kV, nodo 13.8 kV

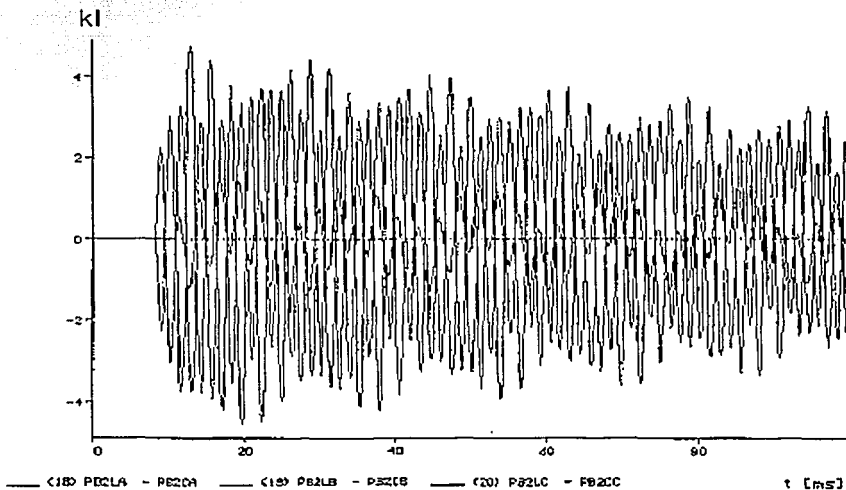


Fig. 4.21 Energización de banco de capacitores de 13.8 kV, nodo 13.8 kV

La figura 4.21 nos muestra la corriente absorbida por la energización del banco de capacitores en el lado de 13.8 kV, la cual como se observa presenta una forma totalmente distorsionada, con ligera atenuación, alcanzando valores máximos de corriente de cerca de 5 kA.

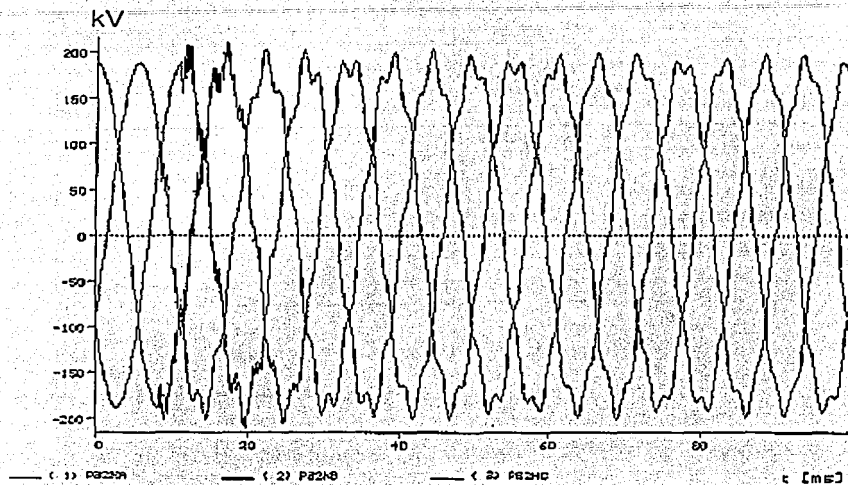


Fig. 4.22 Energización de un banco de capacitores de 13.8 kV, nodo de 230 kV

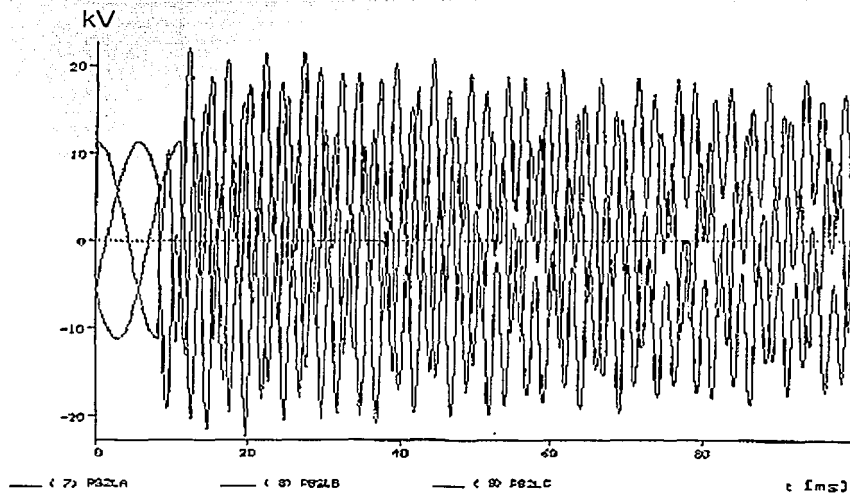


Fig. 4.23 Energización de un banco de capacitores de 13.8 kV, nodo de 13.8 kV

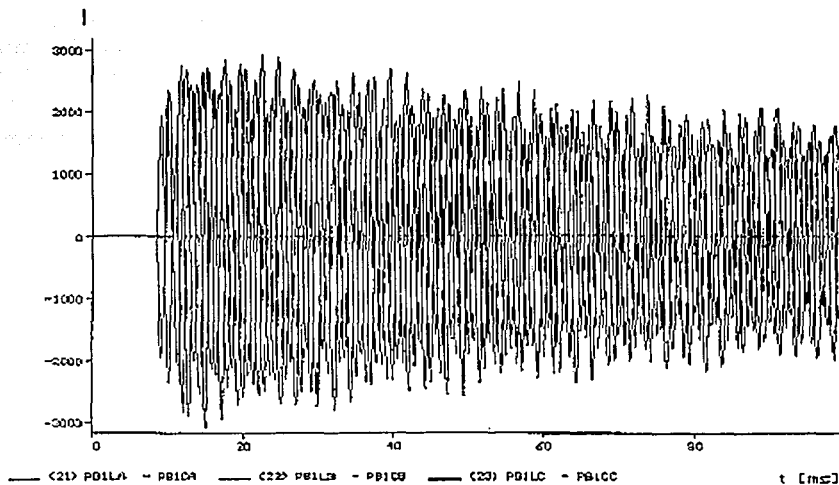


Fig. 4.24 Energización de un banco de capacitores de 13.8 kV, nodo de 13.8 kV

Las figuras 4.22 a 4.24 muestran los resultados de la simulación del cierre de un interruptor de un banco de capacitores de 6 MVAR a un nodo de distribución de 13.8 kV de una subestación de distribución de 230-13.8 kV alimentada por un sistema eléctrico de potencia.

Los resultados mostrados en las gráficas de simulación para este caso, son similares al caso anterior y no requieren mayor descripción, salvo que los efectos son menores debido a las características del equipo involucrado.

Observamos también que la corriente aparece hasta que el interruptor es conectado, con valores crecientes hasta alcanzar el valor máximo, para posteriormente mantenerse oscilando con una ligera atenuación.

Los resultados mostrados en las gráficas de simulación para este caso, son similares al caso anterior y no requieren mayor descripción, salvo que los efectos son menores debido a las características del equipo involucrado.

Las figuras 4.25 a 4.27 muestran los resultados de la simulación del cierre de un interruptor de un banco de capacitores de 9 MVAR y posteriormente otro de 6 MVAR a un nodo de distribución de 13.8 kV, de una subestación de distribución de 230-13.8 kV alimentada por un sistema eléctrico de potencia.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

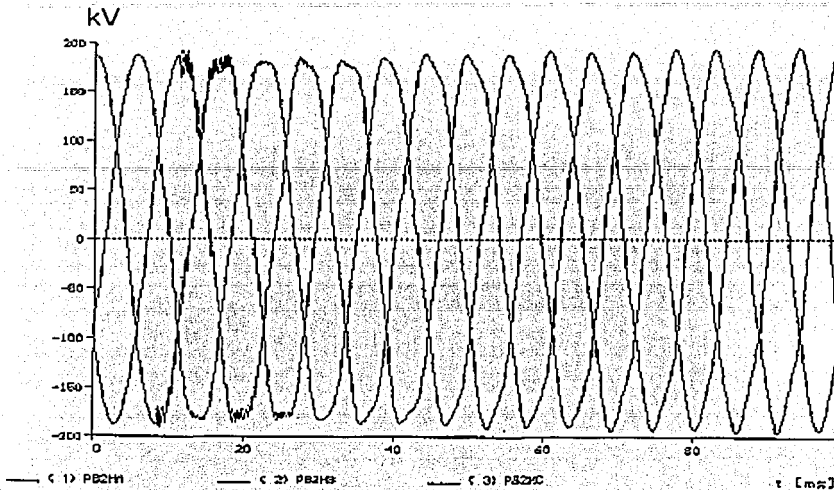


Fig. 4.25 Energización de dos bancos de capacitores de 9 y 6 MVAR, 13.8 kV, uno después de otro; nodo de 230 kV

La figura 4.25 muestra la variación de la tensión de las tres fases en el lado de 230 kV de una subestación 230-13.8 kV, durante la maniobra de cierre de los interruptores de dos bancos de capacitores de 9 y 6 MVAR al bus de 13.8 kV, atenuada por la impedancia del transformador de la subestación; el cierre del interruptor se realiza después de 5.5 milisegundos a partir del cual se inicia la distorsión de la onda de tensión que se mantiene durante los siguientes 25 milisegundos, atenuándose con la impedancia del transformador en función del tiempo, pero que prácticamente permanece deformada durante 50% del periodo de simulación de 100 milisegundos.

Como en los casos anteriores observamos que durante el tiempo que el interruptor del banco de capacitores no se conecta, la onda de tensión permanece estable,

La figura 4.26 muestra la variación de la tensión de las tres fases en el nodo de 13.8 kV, durante la energización de los bancos de capacitores de 9 y 6 MVAR instalados en su bus de distribución uno después de otro; el cierre de los interruptores se realiza uno a continuación de otro después de 5.5 milisegundos a partir de donde se manifiesta la distorsión de la onda de tensión que como se observa es más severa que la que se mostró para el lado de 230 kV del sistema; asimismo se puede observar que la distorsión alcanza valores prácticamente mayores del 150% de la tensión del nodo (13.8 kV) manteniéndose la distorsión prácticamente todo el tiempo de simulación con muy ligera atenuación.

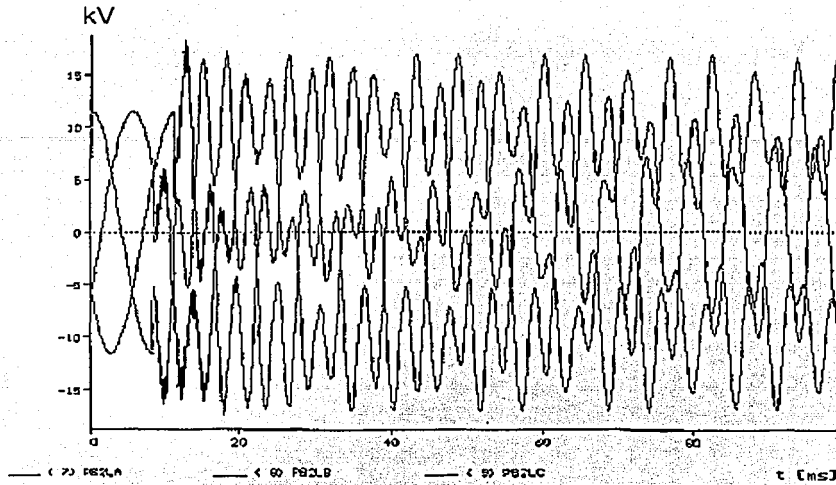


Fig. 4.26 Energización de dos bancos de capacitores de 9 y 6 MVAR, 13.8 kV, uno después de otro; nodo de 13.8 kV.

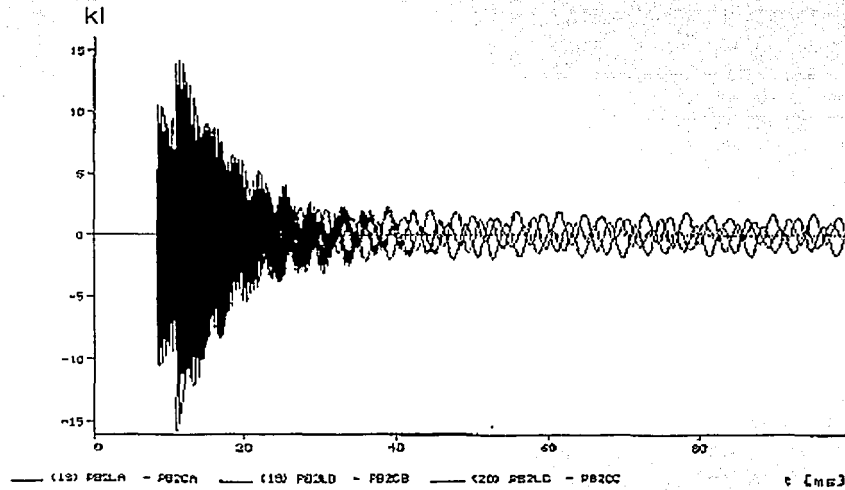


Fig. 4.27 Energización de dos bancos de capacitores de 9 y 6 MVAR, 13.8 kV, uno después de otro; nodo de 13.8 kV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La figura 4.27 nos muestra la corriente absorbida por la energización del banco de capacitores en el lado de 13.8 kV, la cual como se observa se inicia después del cierre del interruptor alcanzando un primer valor máximo de corriente durante el primer cierre, iniciando un pequeño amortiguamiento para inmediatamente presentar el efecto de la conexión del segundo banco de capacitores, durante el cual se presenta un segundo transitorio de corriente que alcanza su valor máximo en 15 kiloamperes para posteriormente amortiguarse nuevamente en forma paulatina hasta estabilizarse.

La simulación para la conexión de los bancos de 6 y 9 MVAR uno después del otro es muy similar al descrito y no requiere mayor atención.

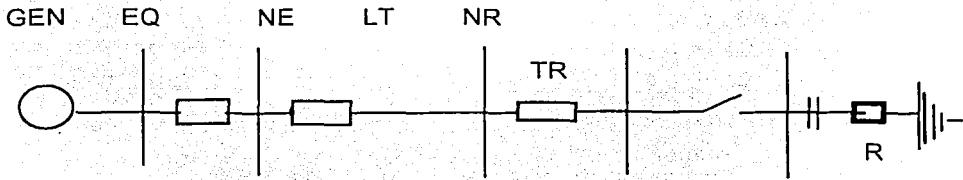
De los resultados obtenidos para los diferentes casos simulados, podemos concluir que la mejor solución para la operación óptima de bancos de capacitores y evitar las sobretensiones por maniobras de los interruptores correspondientes, cuando existe más de un banco conectados a una misma barra de distribución, consiste en intercalar una impedancia limitadora de las corrientes de inrush entre los diferentes bancos.

Esta medida no solamente favorece desde el punto de vista de operación del equipo, sino que además es notablemente más económica que cualquiera de las posibles medidas alternativas existentes; [3], [4], [12], [15], [17], [19], [20], [23], [26], [31], [34], [39], [44], [45].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

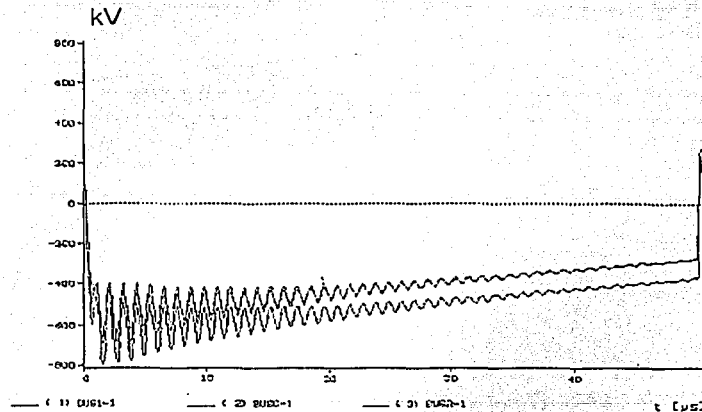
CASO 4.- SOBRETENSION DEBIDA A UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA DE 500 kV EN UN REACTOR DE UN BANCO DE CAPACITORES

Este caso tiene como objeto analizar el comportamiento de una sobretensión por descarga atmosférica con magnitud de 550 kV, que cae sobre el reactor de acoplamiento de un banco de capacitores, instalado en el bus de baja tensión de un transformador de distribución de una subestación, ubicado entre el propio banco y el neutro de la estrella del circuito; la sobretensión desde luego corresponde a una onda de 1.2/50 μ s que es la onda normalizada para descargas atmosféricas y el diagrama unifilar de conexiones del circuito de prueba es el siguiente:



4.28 Diagrama de conexiones para la prueba de sobretensión por descarga atmosférica en el reactor de un banco de capacitores.

En el cual representamos el equivalente de Thevenin del sistema, la impedancia de una línea de transmisión de interconexión entre el sistema y la subestación en donde se encuentra el banco de capacitores, el apartarrayo en el extremo de la línea de transmisión en la subestación receptora, el capacitor y el reactor analizado.



TESIS CON
FALLA DE CALIFICACION

Fig. 4.29 Sobretensión por una descarga atmosférica de 550 kV en el reactor del neutro de un banco de capacitores.

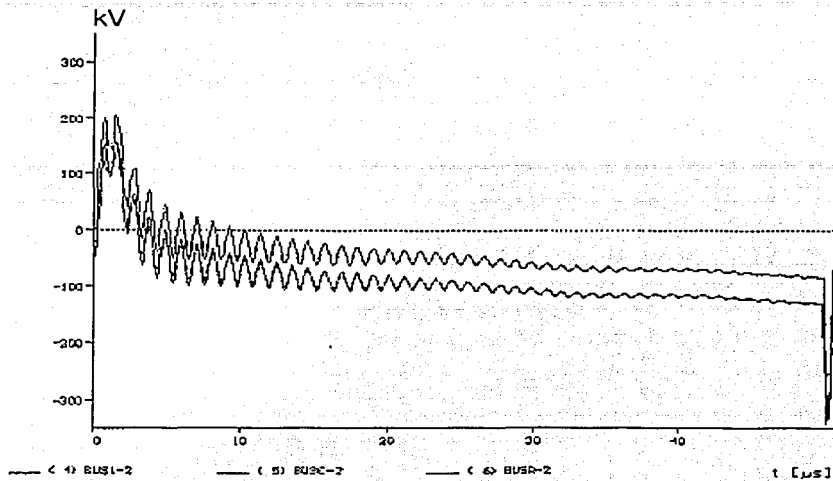


Fig. 4.30 Sobretensión por una descarga atmosférica de 550 kV en el reactor del neutro de un banco de capacitores

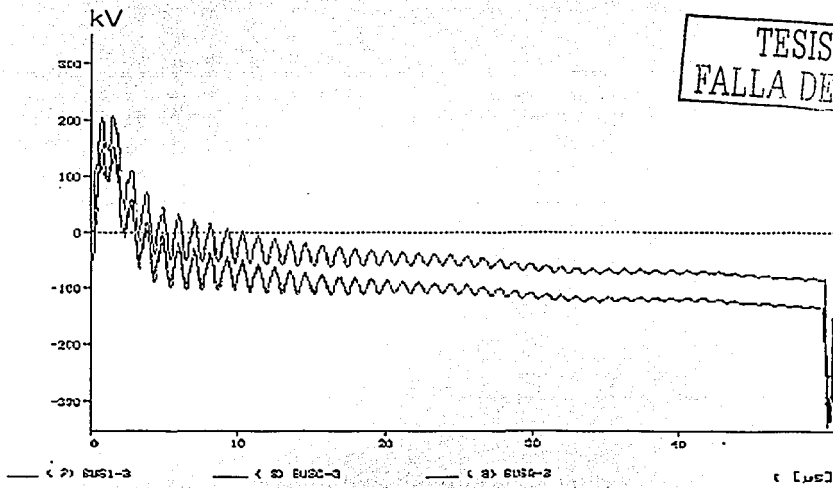


Fig. 4.31 sobretensión por una descarga atmosférica de 550 kV en el reactor del neutro de un banco de capacitores

Como puede observarse el reactor se encuentra conectado entre el banco de capacitores y el neutro de la conexión estrella de los capacitores.

Las figuras 4.29 a 4.38 corresponden a las gráficas de la sobretensiones y corrientes en diferentes puntos del sistema analizado.

Las fig. 4.29 4.30 y 4.31 nos muestran la sobretensión en las barras 1, 2 y 3 de media tensión de abastecimiento de los capacitores, en el capacitor y en el reactor; las cuales se atenúan con él, tiempo, sufriendo una descarga súbita con polaridad variable en los tres casos después de los cincuenta microsegundos.

Las figuras 4.32 y 4.33 nos muestran las sobretensiones en las mismas barras 1, 2 y 3 pero ahora en el lado de alta tensión de la fuente de alimentación en el primario del transformador, en donde observamos nuevamente las sobretensiones atenuadas no solamente por el tiempo, sino por la impedancia del transformador en su paso de baja a alta tensión.

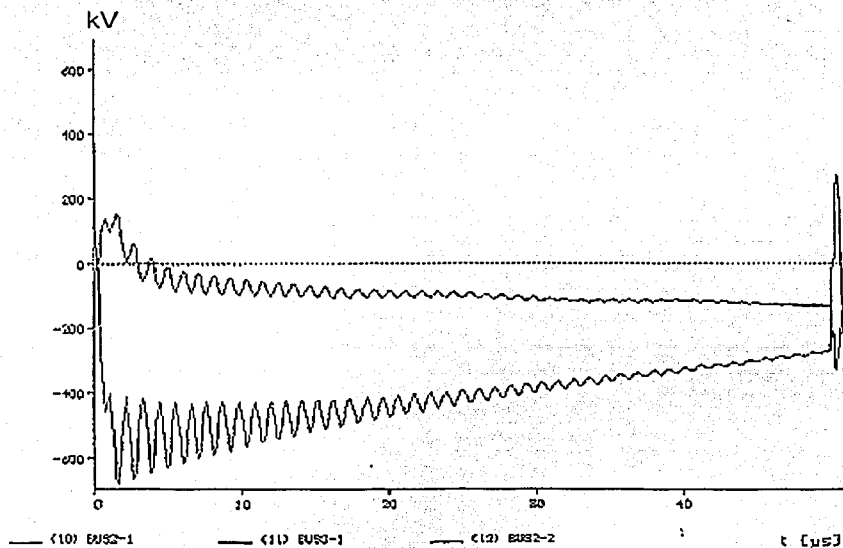


Fig. 4.32 sobretensión por una descarga atmosférica de 550 kV en el reactor del neutro de un banco de capacitores

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

kV

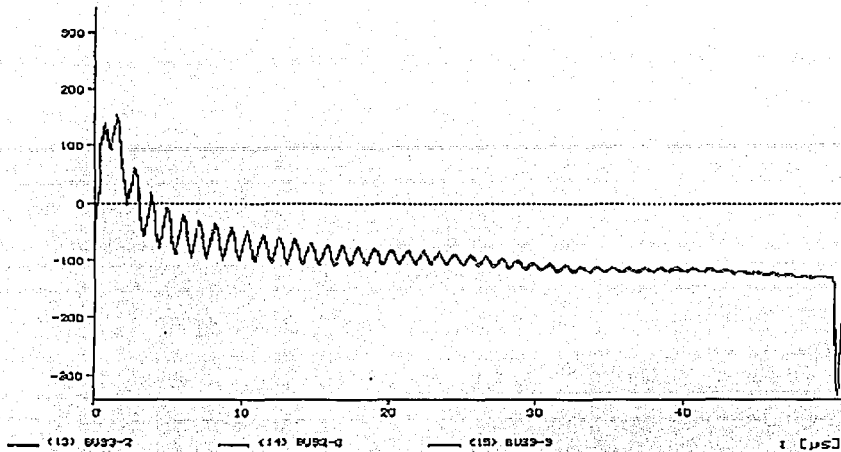


Fig. 4.33 sobretensión por una descarga atmosférica de 550 kV en el reactor del neutro de un banco de capacitores

Las figuras 4.34 y 4.35 muestran los efectos de la sobretensión en el neutro del banco de capacitores y el impulso de la descarga reproducida respectivamente.

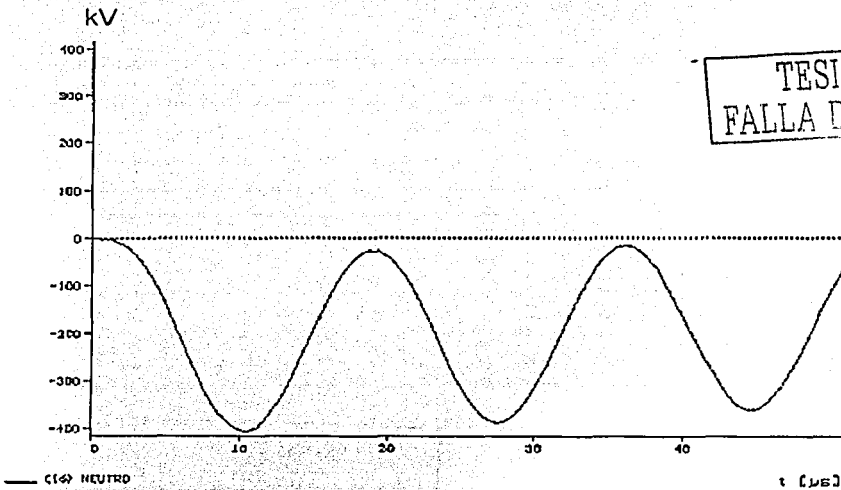


Fig. 4.34 sobretensión por una descarga atmosférica de 550 kV en el reactor del neutro de un banco de capacitores

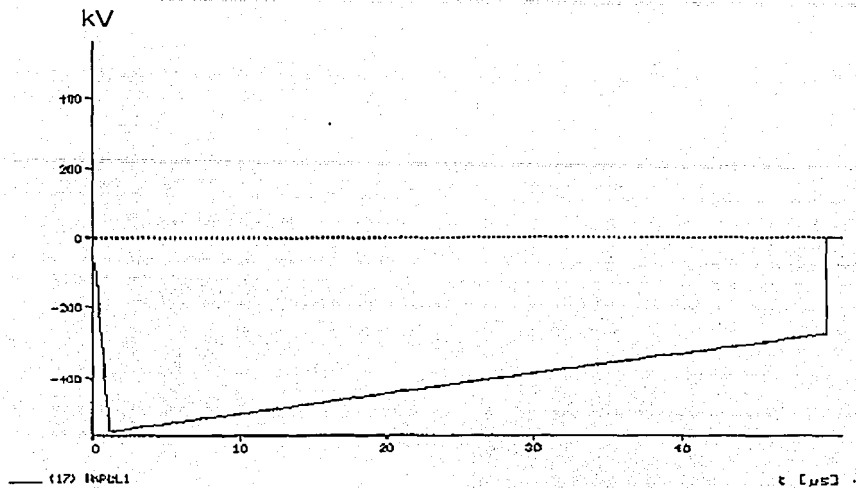


Fig. 4.35 Sobretensión por una descarga atmosférica de 550 kV en el reactor del neutro de un banco de capacitores; [3],[4], [5], [7], [8], [12], [13], [15], [16], [19], [20]. [24], [26], [28], [31], [34], [43], [44], [45].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 5 SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS Y COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO DE APARTARRAYOS DE ÓXIDOS METÁLICOS.

Como ya hemos mencionado, la selección de un apartarrayos de óxido de metal para una aplicación dada es un compromiso entre los niveles de protección requeridos, la capacidad temporal de la sobretensión esperada y la cantidad de energía disipada; la selección de la tensión adecuada, garantiza la posibilidad de que el apartarrayos soporte las condiciones de sobretensión en el sistema con un margen de protección requerido para el nivel de aislamiento esperado.

La posibilidad de obtener una óptima combinación depende de qué tan conocidas o estimadas puedan ser las características de los apartarrayos y que tan identificadas estén las características de operación del sistema al que se aplicarán; una óptima selección requiere además un conocimiento detallado de la capacidad de manejo de energía con que cuente el apartarrayos y el valor de las sobretensiones temporales de diseño del sistema, por lo cual la información del fabricante permitirá seleccionar al apartarrayos de tal manera que el sistema quede protegido contra las condiciones de sobretensiones internas o externas, empleando el procedimiento recomendado por IEC para la selección de los apartarrayos de óxidos de metal [19].

Para facilitar la selección de los elementos de protección, los comités 13 y 33 de CIGRE, elaboraron un diagrama que condensa información sobre factores de sobretensión producidos por el cierre y recierre de líneas de transmisión, mostrado en capítulo 2 incluyendo resultados de simulaciones digitales en analizadores de transitorios y mediciones en campo; en dicho diagrama se muestran valores mínimos, medios y máximos para una combinación de condiciones del sistema que forma un árbol de decisiones, las opciones son: cierre o recierre trifásico con o sin resistencia de preinserción, con una fuente inductiva o compleja como sistemas con cables, en los que debe añadirse una capacitancia en paralelo en el equivalente de Thevenin, compensación en paralelo mayor o menor al 50%, [24].

Actualmente es conveniente comparar los efectos de diferentes tipos de apartarrayos y hacer una fundamentación más completa entre las características de energía y la sobretensión, por lo tanto es necesario tomar en cuenta las características de operación del sistema; el año de 1990 el grupo de trabajo 37 de IEC desarrolló un nuevo estándar para la selección de los apartarrayos de óxidos metálicos, haciendo énfasis en la elección de la tensión de operación continua U_c , la tensión residual U_r , y la capacidad de energía manejada.

SELECCIÓN DE LA TENSIÓN DE OPERACIÓN CONTINUA U_c

U_c es el valor eficaz permisible de tensión que puede ser aplicado continuamente entre las terminales del apartarrayos, para apartarrayos de óxidos de metal este valor es proporcionado por el fabricante, que toma en cuenta la posible distribución no uniforme de la tensión de la red y los esfuerzos requeridos para

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

absorber energía producidos por maniobras súbitas de interruptores, descargas atmosféricas, etc., así como también la estabilidad térmica a la que pueda ser sometido el apartarrayos.

Con el valor de tensión de operación continua U_c se puede seleccionar la estructura externa del apartarrayos, los componentes internos, y efectuar la posible graduación de los anillos.

Para una tensión de operación continua U_c dada es sumamente importante examinar en pruebas tipo, de acuerdo a los estándares no solo las secciones del apartarrayos sino el apartarrayos completo.

La diferencia entre la tensión de cresta dividida entre raíz de dos aplicada a través de las terminales del apartarrayos y U_c , se denomina U_{ca} ; U_c debe de seleccionarse mayor o igual que U_{ca} para incluir el efecto de las armónicas; cuando no se conoce exactamente el valor de U_{ca} se tendrá que tomar como el valor de la tensión de cresta del sistema dividido entre raíz de seis ($\sqrt{6}$) para apartarrayos de fase a tierra; si la tensión de cresta no es conocida, se podrá utilizar la tensión de mayor magnitud que se encuentre en el equipo U_m , que corresponde a la tensión nominal del sistema más un cinco por ciento ($U_m = 1.05U_n$).

Las condiciones normales de servicio de los equipos son mencionadas en los estándares o en los manuales, entre las condiciones más importantes de operación del sistema podemos mencionar las siguientes: rango de temperatura de operación $+40^\circ\text{C}$, la tensión de operación, la frecuencia de operación 48 a 62 cps, también hay que considerar la presencia o ausencia de fuentes de calor, si alguna de las condiciones antes mencionadas está fuera de los límites que se han mencionado, será conveniente consultar al fabricante.

Tensión residual U_r y capacidad de las sobretensiones temporales .

Cuando el valor de la tensión continua requerida U_c para el apartarrayos de óxido de metal es determinado, el valor para la sobretensión temporal (TOV) combinado con la capacidad de energía necesaria para cuando ocurra un estado transitorio, determinarán el valor de tensión del apartarrayos.

De acuerdo con el estándar 71 de IEC una sobretensión temporal es una sobretensión oscilatoria de fase a tierra o de fase a fase, con una ubicación definida de relativa larga duración sobrearmortiguada o ligeramente amortiguada; las sobretensiones temporales son originadas por maniobras de interruptores, fallas entre fases o de fase a tierra, rechazos de carga y debido a la no linealidad de los efectos de ferresonancia, armónicas, etc.; dichas sobretensiones se pueden clasificar de acuerdo a su amplitud, sus frecuencias de oscilación, el tiempo total de su duración o su decremento [24].

De acuerdo con esta definición para apartarrayos de óxido de metal, cualquier tensión mayor de U_c se define como sobretensión temporal, la duración de una sobretensión temporal puede ser desde unos cuantos ciclos hasta varias horas; en sistemas con neutro aislado o resonante, una sobretensión temporal puede tener una duración de más de 24 horas.

El valor de tensión de un apartarrayos de óxido de metal especifica la capacidad de sobretensión establecida en las pruebas obligatorias de operación, en el nuevo estándar de la IEC; diferentes apartarrayos pueden tener el mismo valor de U_c pero diferentes valores de tensión; de tal manera que están designados para la misma tensión de operación del sistema, pero con diferentes requerimientos de sobretensiones temporales.

Un apartarrayos que cumple con el estándar vigente de IEC, está especificado para tener una capacidad de sobretensión para 10 segundos igual o mayor que el valor de tensión después de que empieza a aumentar su temperatura a 60 grados centígrados y disipando determinada cantidad de energía; dicha energía esta definida por dos subsecuentes líneas de descarga: con apartarrayos de 10 KA de descarga, clases 2 y 3, y para apartarrayos de 20 KA de descarga clases 4 y 5; para apartarrayos con 5 y 10 KA de descarga, clase 1, la energía la toman de una gran corriente de impulso; apartarrayos de gran descarga eléctrica de 20 KA, la energía es tomada por tres altas corrientes de impulso.

La energía absorbida por el apartarrayos en estas pruebas, antes de la aplicación del valor de la tensión, debe estar de acuerdo con las especificaciones del fabricante; una guía para encontrar la energía generada en un apartarrayos de óxido de metal, dependiendo de la clase de línea de descarga y de la tensión de impulso residual por maniobra, puede ser obtenida de las referencias del equipo [3].

Determinación de las sobretensiones temporales debidas a fallas a tierra

El factor de falla a tierra k es la relación entre la tensión eficaz más alta a la frecuencia del sistema en la fase sana, en el punto de falla, durante una falla de fase a tierra y la tensión eficaz a la frecuencia del sistema fase-tierra sin la falla, (IEC-71-1).

El factor de falla a tierra se calcula utilizando las impedancias complejas Z_1 y Z_0 de los sistemas de secuencia positiva y cero, tomando en cuenta la resistencia de falla R , donde:

$Z_1 = R_1 + jX_1$: resistencia y reactancia del sistema de secuencia positiva y negativa

$Z_0 = R_0 + jX_0$: resistencia y reactancia del sistema de secuencia cero

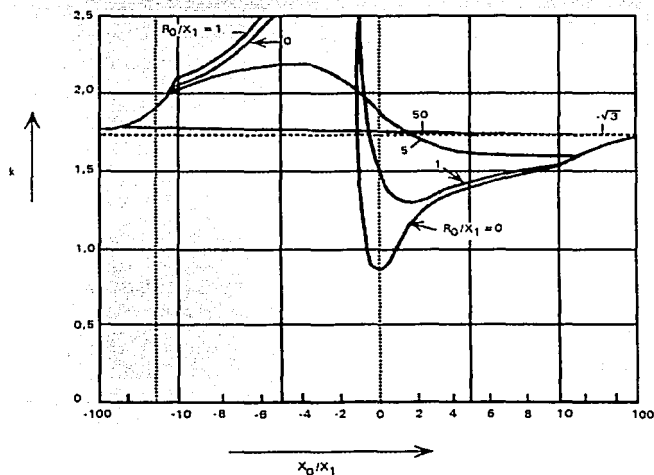
En la figura 5.1 se muestra la variación de la tensión para $R_1 \ll X_1$ y $R = 0$. La gama de valores positivos y/o negativos altos para X_0/X_1 , se aplican a sistemas con neutro aislado o resonante aterrizado.

La gama de valores positivos bajos de X_0/X_1 , corresponden a sistemas con neutro aterrizado; la gama de valores negativos bajos de X_0/X_1 , que se muestran entre las líneas punteadas, no son adecuados para aplicaciones prácticas debido a condiciones de resonancia.

Para sistemas con neutro aterrizado, las figuras 5.2 a 5.5 muestran los factores de falla a tierra como una familia de curvas aplicables a valores particulares de R_1/X_1 ; las curvas se dividen en regiones, representando las condiciones más críticas por medio de los siguientes métodos de presentación:

- La tensión máxima se presenta en la fase que adelanta a la fase fallada, durante una falla fase-tierra.
- La tensión máxima se presenta en la fase que atrasa a la fase fallada, durante una falla fase-tierra.
- - - - - La tensión máxima se presenta en las fases no falladas, durante una falla fase-tierra.

Las curvas son válidas para valores de resistencia de falla que den los factores de falla a tierra más altos; [3], [6], [9], [18], [19], [20], [22], [24], [26]



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 5.1.- Factor de falla a tierra k en función de X_0/X_1 para $R_1/X_1=R=0$

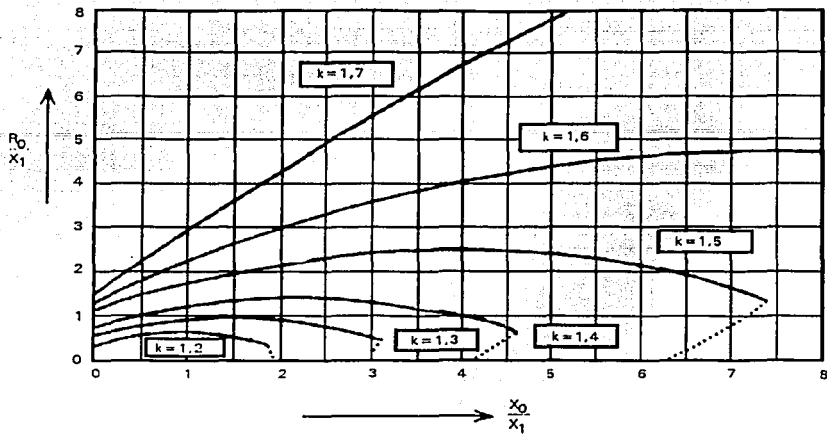


Figura 5.2.- Relación entre R_0/X_1 y X_0/X_1 para valores constantes del factor de falla a tierra k , para $R_1 = 0$.

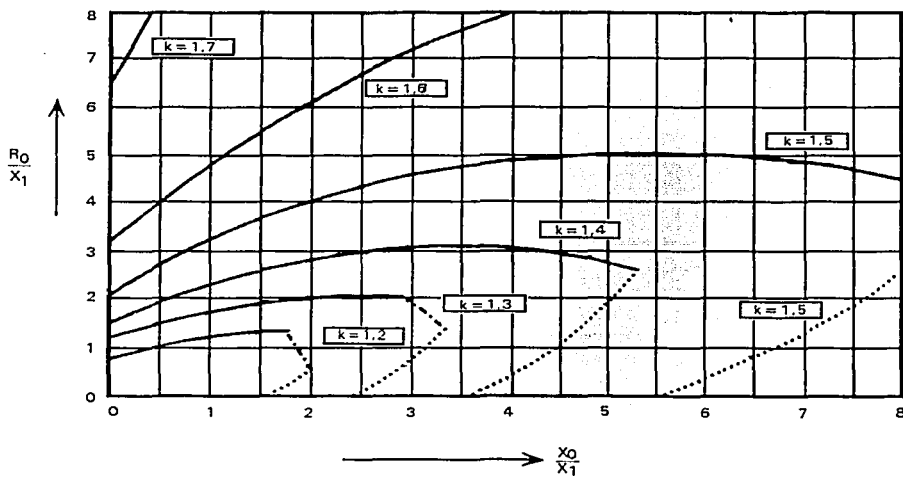


Figura 5.3.- Relación entre R_0/X_1 y X_0/X_1 para valores constantes del factor de falla a tierra k , para $R_1 = 0,5 X_1$.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

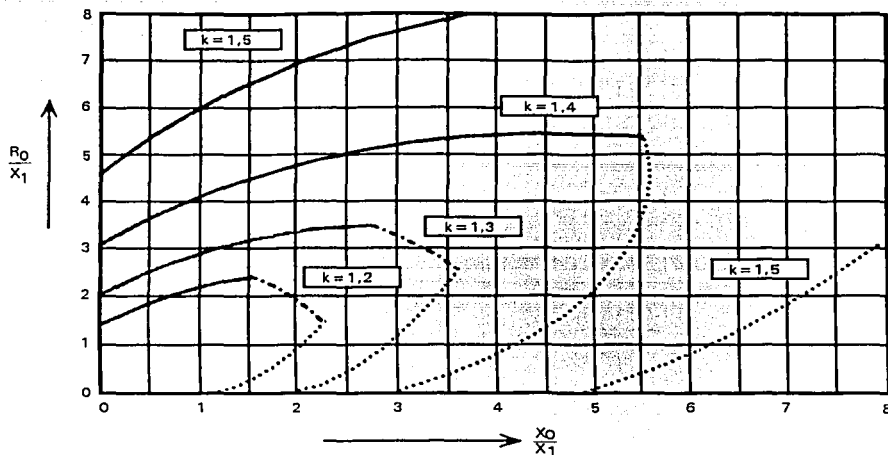


Figura 5.4.- Relación entre R_0/X_1 y X_0/X_1 para valores constantes del factor de falla a tierra k , para $R_1 = X_1$

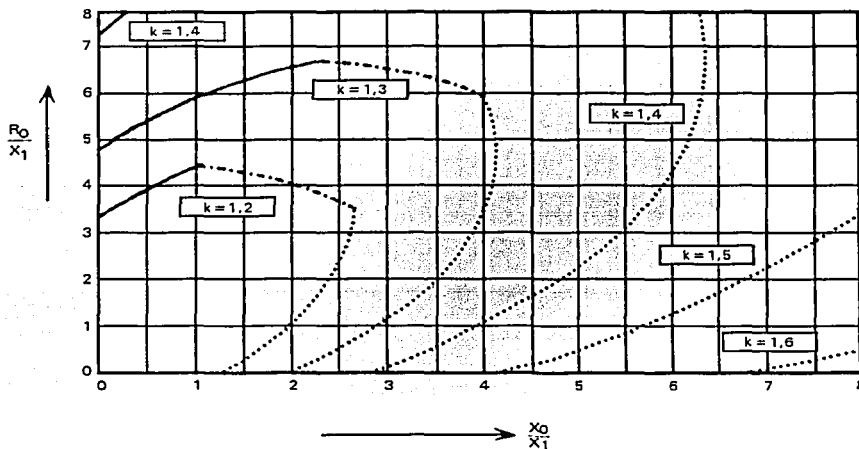


Figura 5.5.- Relación entre R_0/X_1 y X_0/X_1 para valores constantes del factor de falla a tierra k , para $R_1 = 2X_1$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Determinación de las sobretensiones representativas de frente lento, debidas a energización y recierre de líneas

La determinación de sobretensiones representativas debidas a energización y recierre de líneas, la respuesta del aislamiento bajo estas sobretensiones y las consecuencias para el procedimiento de la coordinación de aislamiento en sus configuraciones fase a fase y fase a tierra, han sido investigadas y publicadas por el comité de estudio 33 de CIGRE y su aplicación se ha resumido introduciendo simplificaciones para la utilización de esta guía.

Los principios son derivados por el método fase-pico relativo a la evaluación de sobretensiones, y en particular las simplificaciones obtenidas, también son válidas cuando es utilizado el método de pico envolvente.

Distribución de probabilidad de la amplitud representativa de la sobretensión esperada fase a tierra

De los valores de sobretensión 2% fase a tierra (valores u_{e2} obtenidos de la figura 1.9), la distribución de probabilidad representativa puede ser estimada mediante los métodos siguientes:

Método fase-pico

Valor de sobretensión 2%:	u_{e2} ;	
Desviación:	$\sigma_e = 0,25(u_{e2} - 1)$;	(1)
Valor de truncación:	$u_{et} = 1,25u_{e2} - 0,25$.	(2)

Puede observarse que si $(u_{e2} = u_{e50} + 2\sigma_e)$ entonces $(u_{et} = u_{e50} + 3\sigma_e)$

Método pico-envolvente

Valor de sobretensión 2%:	u_{e2} ;	
Desviación:	$\sigma_e = 0,17(u_{e2} - 1)$;	(3)
Valor de truncación:	$u_{et} = 1,13u_{e2} - 0,13$.	(4)

Como habíamos considerado para la misma operación de maniobra, los valores de truncación obtenidos por los dos métodos son iguales; en consecuencia, los valores de sobretensión 2% y las desviaciones deben ser diferentes.

Los valores correctos para ambos métodos pueden ser obtenidos a partir de estudios o simulaciones digitales, sin embargo, en vista de la dispersión de resultados, la figura 5.6 puede ser utilizada para ambos métodos [19].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Distribución de probabilidad de la amplitud representativa de la sobretensión esperada fase a fase

En general, la "característica de aislamiento" deberá ser tomada en cuenta para la evaluación de la sobretensión trifásica, a fin de determinar el instante más crítico de la forma de sobretensión [3]; este instante más crítico estará suficientemente definido por uno de los tres instantes siguientes:

-Instante del pico positivo de la sobretensión fase a tierra

En este instante, las sobretensiones están descritas por:

El pico positivo en cada terminal;

La componente negativa más alta de las dos terminales adyacentes, que den el mayor esfuerzo dieléctrico entre fases;

La componente negativa más baja de las dos terminales adyacentes.

-Instante del pico negativo de la sobretensión fase a tierra

Este instante es equivalente al instante del pico positivo, pero con polaridades opuestas.

-Instante del pico de sobretensión fase a fase

En este instante, las sobretensiones están descritas por:

El pico de sobretensión fase a fase entre cada par de terminales;

La componente positiva y negativa de esta sobretensión

La componente en la tercera terminal a tierra.

La tercera componente es pequeña en todos los instantes, por lo tanto, la sobretensión puede ser descrita por dos componentes en dos fases, con la tercera fase aterrizada.

La distribución de probabilidad de las sobretensiones es de doble variable, debido a que ambas componentes varían; en una distribución de probabilidad de doble variable, el valor sencillo de la densidad de probabilidad de voltaje usualmente utilizado, se reemplaza por la combinación de sobretensiones, las cuales tienen la misma densidad de probabilidad. Estas combinaciones forman curvas, las cuales son elipses cuando se utilizan distribuciones Gaussianas para aproximar la distribución de probabilidad de las componentes; con el caso especial de formar círculos si la dispersión de las dos distribuciones de probabilidad son iguales, si se utilizan distribuciones de Weibull, las curvas son similares a elipses o

círculos; una función de distribución conjunta para dos variables aleatorias estaría formalmente definida por la siguiente expresión:

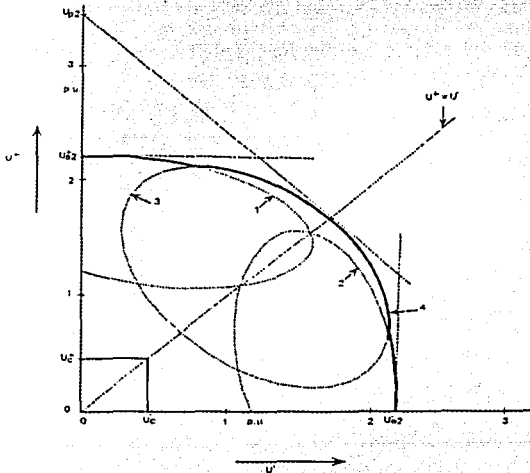
$$F(U_1, U_2) = \iint f(U_1, U_2) dU_1 dU_2$$

En donde $f(U_1, U_2)$ es la densidad de probabilidad conjunta, si a esta densidad de probabilidad conjunta se le asigna un valor constante y graficamos la dependencia entre las dos variables aleatorias, resultarían las curvas elípticas o circulares antes mencionadas; si se gráfica la densidad de probabilidad conjunta dependiente de las dos variables aleatorias; se observaría una gráfica en tres dimensiones similar a la copa de un sombrero, en caso de utilizar densidades de probabilidad Gaussianas [19].

Los límites de integración corresponderían a los valores de probabilidad de que las variables aleatorias U_1 y U_2 se encuentren entre los límites dados, es decir:

$P(a_1 < U_1 \leq b_1, a_2 < U_2 \leq b_2) = F(U_1, U_2)$ evaluada entre esos límites

En la integración de la densidad de probabilidad de una variable, se obtiene la probabilidad entre los límites dados (valor entre 0 y 1) y corresponde al área bajo la curva; para una densidad de probabilidad conjunta, con la doble integral también se obtiene la probabilidad entre los límites dados (valor entre 0 y 1) y corresponde al volumen bajo la superficie de esta densidad conjunta.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

* Fig. 5.6 Tangente de probabilidad 2% para tres instantes.

Además de la existencia de la curva de densidad de probabilidad constante, una característica adicional de la curva es que, cada tangente a ella, define una sobretensión compuesta fase a fase de probabilidad constante; la figura 5.6 muestra un ejemplo correspondiente a una tangente de probabilidad 2% para los tres instantes mencionados anteriormente; de acuerdo a la evaluación de las sobretensiones, solamente una de las tres curvas corresponde al instante más crítico para el aislamiento y solamente esta curva es representativa para las sobretensiones.

Con el fin de simplificar y de tomar en cuenta los instantes entre uno de los tres seleccionados, se representan las tres curvas por un círculo dado en la figura 5.7, este círculo está completamente definido por el pico positivo de sobretensión fase a tierra, el pico negativo de la sobretensión fase a tierra, ambos de igual magnitud y el pico de la sobretensión fase a fase; el círculo tiene su centro en:

$$U_c^+ = U_c^- = \frac{U_p - \sqrt{2}U_c}{2 - \sqrt{2}} \quad (5.5)$$

y un radio:

$$R_u = \frac{2U_c - U_p}{2 - \sqrt{2}} \quad (5.6)$$

Donde la sobretensión fase a tierra U_c y la sobretensión fase a fase U_p corresponden a la misma probabilidad considerada.

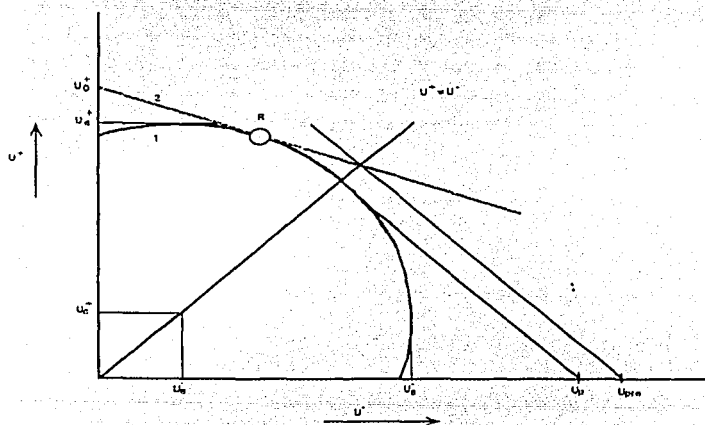


Fig.5.7 Círculo definido por los picos positivo y negativo de sobretensión fase a tierra y el pico de sobretensión fase a fase.

Método fase-pico

Valor de sobretensión 2%: u_{p2} ;
Desviación: $\sigma_e = 0,25(u_{p2} - 1,73)$; (5.7)

Valor de truncación: $u_{pt} = 1,25u_{p2} - 0,43$. (5.8)

Método pico-envolvente

Valor de sobretensión 2%: u_{p2} ;
Desviación: $\sigma_e = 0,17(u_{p2} - 1,73)$ (5.9)

Valor de truncación: $u_{pt} = 1,14u_{p2} - 0,24$. (5.10)

La distribución de probabilidad de la sobretensión fase a fase puede ser estimada a través de las figuras 5.6 y 5.7; [3], [6], [9], [18], [19], [20], [22], [24], [26].

Característica de aislamiento

En la evaluación de las sobretensiones trifásicas la "característica de aislamiento" básica, será tomada en cuenta a fin de determinar el instante de la sobretensión transitoria que sea más crítica para el aislamiento; la figura 5.8 muestra terminales de dos fases y la terminal de tierra, de una configuración completa de aislamiento, en la cual, la tercera fase se desprecia por razones de simplificación, para la descripción de la resistencia dieléctrica de tal configuración, se utilizan dos métodos.

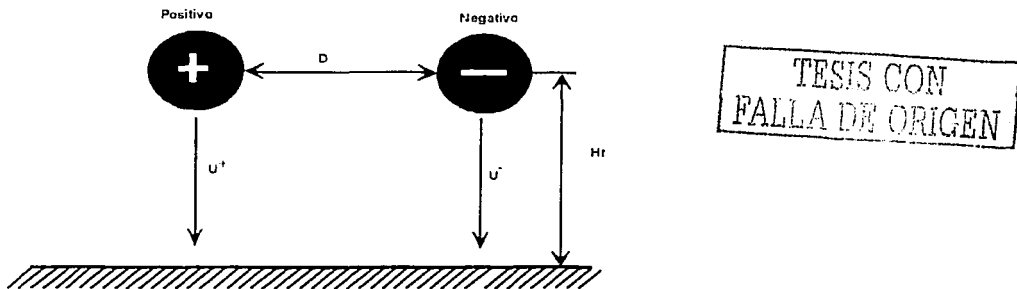


Fig. 5.8 Configuración completa, dos terminales de fases y terminal de tierra.

La componente positiva perteneciendo a una probabilidad de descarga o ruptura dada, se reporta como función de la componente negativa; con esta descripción, una característica de aislamiento se obtiene como se muestra en la figura 5.9 a, para una probabilidad de descarga del 50%

El voltaje total de descarga igual a la suma de las dos componentes, correspondiendo a una probabilidad de descarga dada, es función de la relación α :

$$\alpha = U^- / (U^+ + U^-) = 1 / [1 + (U^+ / U^-)] \quad (5.11)$$

donde:

U^+ Es la componente positiva;
 U^- es la componente negativa

El ejemplo de la figura 5.9 a) resulta entonces en dependencia mostrada en la figura 5.9 b).

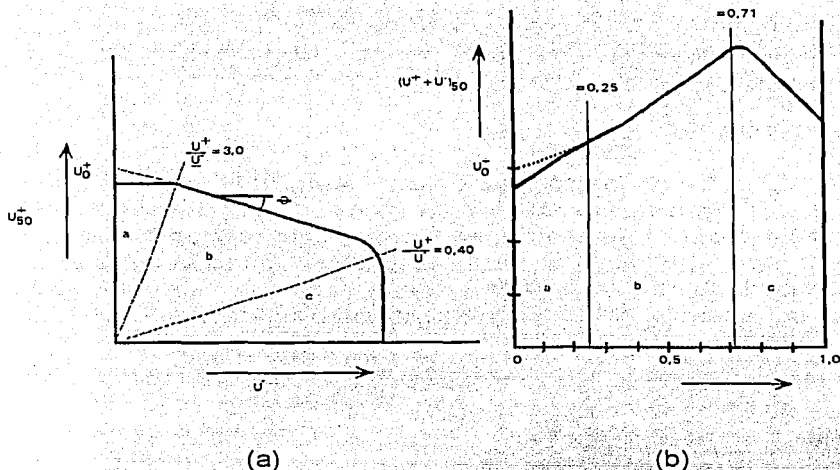


Fig. 5.9 Característica de aislamiento para una probabilidad de descarga del 50%,

La característica de aislamiento está dividida en tres rangos fig. 5.9, el rango 'a' es el rango de descargas de la terminal positiva a tierra; la componente negativa tiene poca o ninguna influencia en la probabilidad de descarga; en rango 'b' las descargas ocurren entre las terminales y la probabilidad de descarga depende de ambas componentes (α deberá ser tomada en cuenta); el rango 'c' corresponde al rango 'a' para descargas de la terminal negativa a tierra.

Los voltajes de descarga en rangos 'a' y 'c' pueden ser determinados con la terminal opuesta aterrizada, es decir, con una componente de voltaje igual a cero; sin embargo, en rango 'b', la relación de las componentes (o relación α) tiene influencia en el resultado; esta parte de la característica de aislamiento, la cual es la responsable del flameo fase a fase, depende de la configuración del electrodo y del

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

proceso físico de la descarga, dos diferentes configuraciones de electrodos de interés son:

Configuraciones de electrodos en los cuales las descargas fase a tierra y las descargas fase a fase ocurren en diferentes partes de la configuración, por ejemplo cuando el radio de los electrodos es muy grande comparado con su separación; la descarga entre fases está determinada exclusivamente por el voltaje total entre fases; la característica de aislamiento en rango 'b' decrece 45° en la figura 5.9 a) o es constante en la figura 5.9 b). Tales configuraciones existen en transformadores de potencia trifásicos o subestaciones aisladas en gas SF6.

Configuraciones de electrodos en los cuales las descargas fase a tierra y las descargas fase a fase ocurren en el mismo punto; para estas configuraciones la característica de aislamiento depende del proceso de descarga [19].

De acuerdo al proceso de descarga, pueden distinguirse tres grupos:

a) Configuraciones con campo eléctrico homogéneo o casi homogéneo

El voltaje de descarga es igual al voltaje corona de inyección y la característica de aislamiento puede ser obtenida por cálculos de campo eléctrico; tales configuraciones de aislamiento se encuentran en subestaciones aisladas en gas SF6 trifásicas.

A pesar de esto, como las dimensiones de los electrodos son grandes comparadas a su separación, el campo dieléctrico entre las fases es poco influenciado por la terminal de tierra y por lo tanto, determinado únicamente por el voltaje total; la característica de aislamiento en rango 'b' decrece aproximadamente 45° en la figura 5.9 a) y es constante en la figura 5.9 b).

b) Claros pequeños de aire con campo eléctrico No-homogéneo

El voltaje de descarga es sustancialmente mayor que el voltaje corona de inyección, este proceso de descarga corresponde al proceso por 'streamer', ya que un 'leader' no se desarrolla debido a la pequeña separación entre electrodos; la probabilidad de descarga está determinada por la suma de las dos componentes, lo cual significa que la característica de aislamiento en rango 'b' decrece en 45° en la fig. 5.9 a) y es constante en la fig. 5.9 b); las distancias en aire para sistemas en Rango I definido en IEC 71-1, pueden ser asociadas a este grupo.

c) Grandes claros de aire con campo eléctrico No-homogéneo

En adición a las consideraciones mencionadas para claros pequeños de aire, aquí toma lugar la formación del 'leader' a partir de la terminal positiva. Esto quiere decir que el campo eléctrico alrededor de la terminal positiva es decisivo y la componente positiva tiene una mayor influencia en la descarga, que la negativa; la

característica de aislamiento decrece en menos de 45° [6], las distancias en aire para sistemas en Rango II definido en IEC 71-1, pueden ser asociadas a este grupo.

En síntesis, la característica de aislamiento para configuraciones de aislamiento de dos fases, se describe mediante:

El voltaje de aguante fase a tierra para el impulso de maniobra positivo. (Corresponde al rango 'a' en figura 5.9);

El voltaje de aguante fase a tierra para el impulso de maniobra negativo. (Corresponde al rango 'c' en figura 5.9);

La característica de aislamiento entre fases (rango 'b' en figura 5.9), en donde ésta puede ser descrita para una representación como en la figura 5.9 a) por:

$$U^+ = U_0^+ + BU^- \quad (5.12)$$

o bien, para una representación como en la figura 5.9 b) por:

$$U^+ + U^- = \frac{U_0^+}{1 - \alpha(1 - B)} \quad (5.13)$$

El valor de la constante B, está relacionada con la inclinación de la característica de aislamiento en rango 'b' y será:

En rango I :

Para todo tipo de aislamiento $B = 1$;

En rango II :

Aislamiento interno: $B = 1$;

Aislamiento externo: $B < 1$.

La figura 5.10 nos da el ángulo ϕ ($B = \tan\phi$) en función de la relación D/H.

La Norma IEC 71-1 define la sobretensión representativa entre fases como aquella que consiste de dos componentes con igual amplitud y polaridad opuesta, esta sobretensión estaría situada en la línea $U^+ = -U^-$ ($\alpha = 0,5$) de la curva de probabilidad de densidad constante figuras 5.6 y 5.7; el esfuerzo dieléctrico más crítico en la configuración de aislamiento, depende de la característica de aislamiento, y en particular, de la inclinación B mencionada en la ecuación (5.12), así, el esfuerzo dieléctrico más crítico estaría dado por las componentes de voltaje a las cuales la característica de aislamiento es tangente al círculo (propuesto como una simplificación en figura 5.7) que describe las sobretensiones; la figura 5.7 muestra que el esfuerzo dieléctrico más crítico, no corresponde a la sobretensión

representativa entre fases definida por IEC 71-1, si la inclinación B es menor a 1, en este caso, la sobretensión representativa debe incrementarse a fin de realizar pruebas con $\alpha = 0,5$ y resultará un nuevo valor de sobretensión representativa fase a fase U_{p2re} dado por:

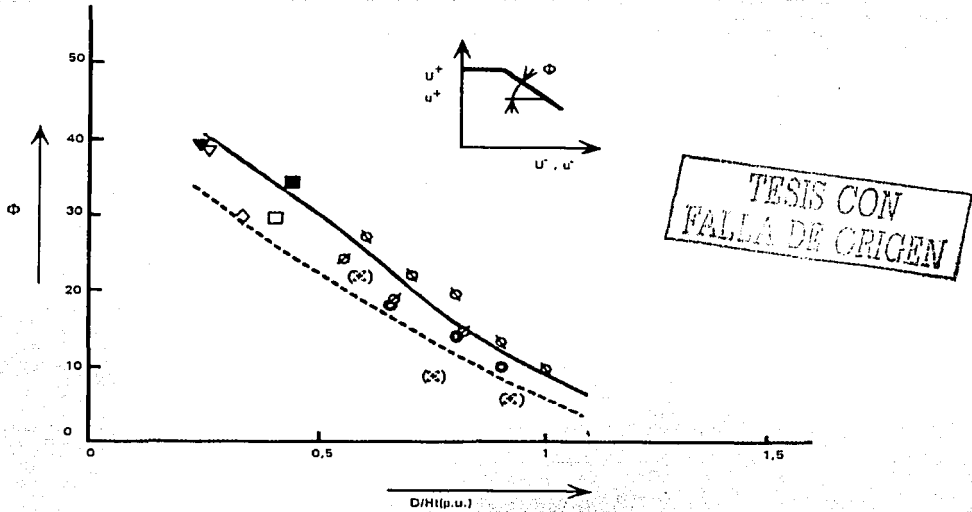


Fig. 5.10 Relación entre el ángulo ϕ ($B = \tan\phi$) vs D/H

$$U_{p2re} = 2(F_1 U_{p2} + F_2 U_{c2}) \quad (5.14)$$

La nueva desviación y el valor de truncación, están dados respectivamente por las ecuaciones (5.15) y (5.16):

$$S_{pre} = 2(F_1 S_p + F_2 S_c) \quad (5.15)$$

$$U_{pre} = 2(F_1 U_{pt} + F_2 U_{ct}) \quad (5.16)$$

en donde:

$$F_1 = \frac{1}{2 - \sqrt{2}} \left[1 - \frac{\sqrt{1 + B^2}}{1 + B} \right]$$

$$F_2 = \frac{1}{2 - \sqrt{2}} \left[2 \frac{\sqrt{1 + B^2}}{1 + B} - \sqrt{2} \right]$$

Si $B = 1$, es decir, para aislamientos interno y externo en rango 1, la sobretensión representativa fase a fase es igual a la sobretensión fase a fase en la curva de densidad de probabilidad constante; si $B < 1$, para aislamiento externo en rango II, la sobretensión representativa fase a fase estará comprendida entre la sobretensión fase a fase para $B = 1$ y el doble de la sobretensión fase a tierra para $B = 0$; [3], [6], [9], [18], [19], [20], [22], [24], [26].

Sobretensiones por descargas atmosféricas

Las sobretensiones en una subestación, dependen de la amplitud y forma de la onda de sobretensión que entra a la subestación desde los conductores de las líneas de transmisión conectadas a ella, la frecuencia con la cual tales sobretensiones inciden, está determinada por el comportamiento ante el rayo de las líneas conectadas a la subestación; en subestaciones o partes de subestaciones a las cuales no se encuentran conectados apartarrayos, el parámetro más importante es la amplitud de la sobretensión arribando; para subestaciones protegidas por apartarrayos, el parámetro más importante es la pendiente de la sobretensión ($MV/\mu s$) y la distancia entre el apartarrayos y el equipo bajo consideración.

La pendiente de la sobretensión arribando se reduce principalmente por el efecto corona de la línea aérea, esto significa, que la pendiente de la onda de sobretensión arribando puede solamente causar una cierta amplitud de sobretensión, si la descarga de rayo cae dentro de una cierta distancia a la subestación para descargas subsecuentes la pendiente será mas baja, independientemente de la amplitud de la onda de sobretensión.

El conocimiento de esta distancia límite es de primordial importancia, en cálculos digitales detallados de sobretensiones, utilizando programas de transitorios, la línea aérea será simulada cuidadosamente sobre esta distancia; además, todas las simplificaciones que toman en cuenta la frecuencia de ocurrencia de las amplitudes de sobretensiones, están basadas en consideraciones similares.

Protección con apartarrayos en subestaciones

Cuando más de una línea aérea se conecta a una subestación, la pendiente original de la onda de sobretensión arribando, puede ser dividida por el número de líneas 'n' (Red compleja). Sin embargo, se hace énfasis en que el número de líneas corresponderá al número mínimo, de aquellas que permanezcan en servicio, tomando en cuenta posibles salidas debido a tormentas eléctricas.

Considerando el hecho de que la pendiente de la onda de sobretensión arribando, se reduce inversamente con la distancia que viaja en la línea, la pendiente S en el equipo protegido será aproximadamente igual a:

$$S = 1/(nK_{co}X) \quad (5.17)$$

en donde:

n: es el número de líneas aéreas conectadas a la subestación; si se involucran torres de circuitos múltiples y han de ser tomados en cuenta flameos inversos en dos sistemas, se recomienda dividir el número por dos.

K_{co} : constante de amortiguamiento por el efecto corona de acuerdo a Tabla 5.1

X: distancia entre el punto donde cae la descarga de rayo y la subestación (m)

El uso del valor de la pendiente S, no produce resultados lo suficientemente precisos para el cálculo de sobretensiones en el equipo. Sin embargo, es conveniente estimar la distancia límite X_p por:

$$X_p = 2T/[nK_{co}(U - U_{pi})] \quad (5.18)$$

U: amplitud más baja de la sobretensión considerada,

T: mayor tiempo de tránsito entre cualquier punto en la subestación y el apartarrayos más cercano (μs);

U_{pi} : nivel de protección del apartarrayos al impulso de rayo.

Para distancias mayores a X_p la pendiente será reducida de tal forma, que la sobretensión del equipo, en general, será más pequeña que el valor considerado U.

Tabla 5.1 Constante de amortiguamiento por efecto corona K_{co}

Configuración de conductor	K_{co} ($\mu s/(KV/m)$)
Un conductor por fase	$1,5 \times 10^{-6}$
Dos conductores por fase	$1,0 \times 10^{-6}$
Tres o cuatro por fase	$0,6 \times 10^{-6}$
Seis u ocho por fase	$0,4 \times 10^{-6}$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Auto- protección de subestación

La autoprotección de la subestación se da cuando la sobretensión de rayo arribando a la subestación desde una línea aérea, se decrementa a un valor menor del voltaje de aguate de coordinación, debido a las propias reflexiones dentro de la

subestación y sin considerar cualquier acción de los apartarrayos. El requisito fundamental, es que el número de líneas conectadas a la subestación sea lo suficientemente grande.

El número necesario de líneas puede ser estimado mediante:

$$n \geq 4 \left[\left(U_{50}^- / U \right) - 1 \right] \quad (5.19)$$

en donde

n: número de líneas aéreas

U_{50}^- : voltaje de flameo 50% al impulso de rayo negativo del aislamiento de línea

U: amplitud de la sobretensión considerada.

En síntesis, la onda de sobretensión arribando a la subestación, no deberá causar tan altas sobretensiones antes de que las reflexiones de las líneas adicionales actúen para decrecerla. Este requisito se cumple si la pendiente de la onda de sobretensión arribando es también pequeña debida a los efectos de amortiguamiento por corona en la línea, que la subestación puede ser considerada como un elemento concentrado. Esto puede considerarse como válido, cuando la descarga de rayo sucede más allá de la distancia límite:

$$X_p \geq 4(T/K_{co} U) \quad (5.20)$$

donde T es el tiempo de tránsito al punto más distante del bus de la subestación (μs).

Un efecto apreciable de autoprotección puede presentarse en el caso de Subestaciones aisladas en Gas SF₆ o subestaciones conectadas con cable, en las cuales, las reflexiones en la entrada de la línea, decrementan las sobretensiones abajo del valor permisible. Esto puede considerarse como válido si se cumple:

$$U > (6Z_s / (Z_s + Z_L)) U_{50}^- \quad (5.21)$$

en donde

Z_s : impedancia característica de la subestación;

Z_L : impedancia característica de la línea aérea

Sin embargo, la distancia entre el punto de la descarga de rayo a la entrada de la subestación, puede no ser tan pequeña, que las reflexiones desde la subestación interfieran con el rayo; por esta razón, las siguientes distancias límite mínimas son aplicables:

$X_p = 1$ claro interpostal para falla de blindaje,

$X_p = 2$ torres para flameos inversos

Amplitud de la sobretensión representativa por descargas atmosféricas

Debido a que un cálculo completo de onda viajera, incluyendo la simulación del índice de comportamiento de la línea, es extremadamente difícil, ha sido propuesto un procedimiento simplificado [19]; dicho procedimiento consiste en calcular una corriente de rayo para un índice (de salidas) deseado y calcular así la sobretensión mediante cálculos de onda viajera en la subestación, incluyendo un circuito equivalente de sección de línea corta.

Penetración de blindaje

La corriente de rayo que determina la onda de sobretensión incidiendo, se calcula a partir del índice de penetración del blindaje, dentro de la distancia límite y la probabilidad de ser excedida:

$$F(I) = F(I_m) + (R_i/R_p) \quad (5.22)$$

donde

$F(I_m)$ es la probabilidad de la corriente de rayo que corresponde al valor máximo para un blindaje total (derivada del modelo electrogeométrico);

R_i ; índice supuesto

R_p ; índice de penetración de blindaje dentro de la distancia límite

El índice de penetración de blindaje puede obtenerse a partir del índice de flameos por falla de blindaje mediante:

$$R_p = \frac{R_{sf}}{F(I_{cr}) - F(I_m)} \quad (5.23)$$

R_{sf} : índice de flameos por falla de blindaje;

$F(I_{cr})$: probabilidad de la corriente que causa flameo de aislamiento de la línea en polaridad negativa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las corrientes correspondientes a las probabilidades, pueden obtenerse de distribuciones de probabilidad de corrientes de descargas de rayo en el rango de falla de blindaje encontrada en publicaciones.

La amplitud de la onda de sobretensión incidiendo y su pendiente, se determina por las ecuaciones (5.24) y 5.25 respectivamente.

$$U_i = Z_i I / 2 \quad (5.24)$$

$$S = 1 / (K_{co} X_T) \quad (5.25)$$

donde:

$$X_T = X_p / 4$$

Su tiempo al valor medio será de 140µs. Si se obtienen valores pico más altos que 1,6 veces el voltaje de flameo de aislamiento en polaridad negativa, se utilizará este valor pico de amplitud para la onda de sobretensión incidente.

La onda de sobretensión incidente, es utilizada para desarrollar cálculos de onda viajera dentro de la subestación y así, se obtienen sobretensiones representativas para ese índice (de salidas) deseado en diferentes lugares de la subestación [19].

Flameo inverso

La corriente de rayo que determina la onda de sobretensión incidente, se determina por el número de descargas de rayo a las torres e hilos de guarda, dentro de la distancia límite y su probabilidad de ser excedida es:

$$F(1) = R_i / R_r \quad (5.26)$$

en donde:

R_i índice (de salidas) considerado

R_r índice de flameos inversos dentro de la distancia límite.

El voltaje creado en la impedancia al pie de la torre por esta corriente, se determina por su tiempo de respuesta y su dependencia de la corriente. Cuando la extensión del pie de la torre está dentro de un radio de 30 m, el tiempo de respuesta puede ser despreciado y la impedancia al pie de la torre será:

$$R_{hc} = \frac{R_{lc}}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (5.27)$$

en donde:

R_{lc} resistencia a baja corriente en el pie de la torre

I_g corriente límite (KA)

La corriente límite I_g representa la ionización del terreno y se evalúa con:

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \frac{E_0 \rho}{R_{lc}^2} \quad (5.28)$$

en donde:

ρ resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$);

E_0 gradiente de ionización del terreno (valor recomendado: 400 KV/m).

La amplitud de la onda de sobretensión incidiendo es entonces dada por:

$$U_i = \frac{(1 - c_r) R_{lc} I}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (5.29)$$

donde c_r es el factor de acoplamiento entre el hilo de guarda y el conductor de fase cuyos valores son:

$c_r = 0,15$ para líneas con un solo hilo de guarda

$c_r = 0,35$ para líneas con doble hilo de guarda

Si se obtienen amplitudes mayores a 1,6 veces el voltaje de flameo de aislamiento en polaridad negativa, una onda de sobretensión arribando con este valor de amplitud, será utilizada.

La onda de sobretensión arribando, tiene una cola con decrecimiento exponencial, con una constante de tiempo dada por la ecuación (5.30) y un incremento lineal en el frente, cuya pendiente S está dada por la ecuación (5.31);

$$\tau = \frac{Z_c L_{sp}}{R_{lc} c} \quad (5.30)$$

donde:

Z_c impedancia característica del hilo de guarda. Valores típicos son; 500Ω para líneas con un solo hilo de guarda y 270Ω para líneas con doble hilo de guarda.

L_{sp} longitud del claro interpostal (m);

c velocidad de la luz ($300 \text{ m}/\mu\text{s}$).

$$S = 1/(K_{co} X_T) \quad (5.31)$$

K_{co} está dado por la ecuación (5.17);

X_T está dado por la ecuación (5.21).

Para cálculos de onda viajera en la subestación considerada, un conductor sencillo de longitud X_T e impedancia característica igual a aquella de los conductores de fase se conecta a la subestación. Una fuente de voltaje con impedancia interna de baja corriente R_{ic} al pie de la torre, es conectada en el extremo del conductor; esto produce un voltaje con los parámetros y forma de la onda de sobretensión incidiendo a la subestación.

Si la amplitud de la onda de sobretensión incidente es mayor a 1,6 veces $U_{50\%}$ en polaridad positiva al impulso de rayo, las simplificaciones no son aplicables y se recomendarán estudios más cuidadosos; lo mismo se aplica para extensiones del pie de la torre mayores a 30 m de radio.

Se obtienen así, dos dependencias de la amplitud de la sobretensión representativa a los índices deseados, uno es para falla de blindaje y otro para flameo inverso; la dependencia total, se obtiene con la suma de los índices deseados para una amplitud constante.

Método simplificado

Se obtiene una simplificación más aplicando los procedimientos descritos considerando que: todas las descargas atmosféricas a cierta distancia de la subestación, causan sobretensiones más altas en el equipo protegido que un valor supuesto y todos los eventos fuera de esta distancia, valores más bajos, la sobretensión en el equipo puede calcularse mediante la ecuación 5.24.

Como ya hemos mencionado, ambas consideraciones no son estrictamente válidas, primero, porque no todos los eventos dentro de una cierta distancia son igualmente de severos, ellos dependen de la corriente del rayo o de la magnitud de la onda de sobretensión entrando a la subestación; segundo, las sobretensiones pueden ser más altas que las calculadas con las ecuaciones 5.24 y 5.25, sin embargo, la práctica común en protección de equipo con apartarrayos ha mostrado que ambas imprecisiones se cancelan una con otra.

Con relación a la distancia X a ser aplicada en la ecuación 5.17 ha mostrado que no ocurren flameos inversos en una torre cercana a la subestación por el propio aterrizaje de la misma, el valor mínimo de X es la longitud de un claro interpostal de la línea aérea, por lo tanto, la pendiente representativa S_{rp} a ser aplicada en la ecuación 5.17 es igual a:

$$S_{rp} = 1/[K_{co}(L_{sp} + L_t)] \quad (5.32)$$

En donde $L_t = (R_t/R_{km})$, es la sección de línea aérea en la cual el índice de flameo por rayo es igual al índice deseado; no ocurren flameos inversos en una torre cercana a la subestación por el propio buen aterrizaje de la subestación y de que no ocurren fallas de blindaje en el primer claro interpostal de la línea aérea y, por lo tanto, hay una mínima longitud de tránsito de la onda de lo cual resulta una posible pendiente máxima.

Así, introduciendo S_{rp} en la ecuación (1) y haciendo $A = 2/(K_{co}c)$ para líneas de transmisión, la dependencia de la sobretensión representativa al impulso por rayo para un índice considerado, se obtiene por:

$$U_{rp} = U_{pl} + \frac{A}{n} \frac{L}{L_{sp} + L_t} \quad (5.33)$$

donde:

U_{rp} amplitud de la sobretensión representativa al impulso de rayo (KV);

A factor dado en la tabla 5.2, que describe el comportamiento de la línea aérea conectada a la subestación;

U_{pl} nivel de protección al impulso de rayo del apartarrayos (KV)

n número mínimo de líneas conectadas a la subestación ($n=1$ o $n=2$);

L distancia de separación del apartarrayos al objeto protegido (mts);

L_{sp} longitud del claro interpostal (mts);

L_t longitud de la línea aérea con un índice de salidas igual al índice considerado o deseado (mts);

R_t índice (de salidas) deseado (1 / año);

R_{km} índice de salidas de la línea aérea por año, para un diseño correspondiente al primer kilómetro en frente de la subestación (ver 5.31) [$1 / (100 \text{ Km} \cdot \text{año})$].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El voltaje de aguante de coordinación se obtiene reemplazando L_1 por la longitud de la línea L_a , la cual produce un índice de salidas igual a un índice de falla aceptable R_a :

$$L_a = R_a / R_{km} \quad (5.34)$$

y el voltaje de aguante de coordinación al impulso por rayo es igual a:

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} \frac{L}{L_{sp} + L_a} \quad (5.35)$$

donde:

- U_{cw} voltaje de aguante de coordinación al impulso por rayo;
- L_a sección de línea aérea con un índice de salidas igual al índice de falla aceptable.
- R_a índice de falla aceptable para el equipo.

Para líneas de transmisión, los factores A son obtenidos de la tabla 5.2 y las constantes de amortiguamiento por el efecto corona K_{co} de la tabla 5.1; para sistemas de distribución, las sobretensiones de rayo generalmente se distribuyen en dos ó más fases y ese compartimiento de corriente de los conductores de fase debe de ser considerado; para torres de acero, los flameos de más de una torre durante una descarga de rayo, conduce a una reducción más de las sobretensiones de rayo, para estas líneas, el factor A será confrontado contra la práctica operativa.

Las subestaciones aisladas en gas SF_6 en general están mejor protegidas que las subestaciones abiertas, debido a que su propia impedancia característica, es mucho menor que la de las líneas aéreas; una recomendación generalmente válida para estimar la mejora obtenida para subestaciones aisladas en gas SF_6 comparada contra subestaciones abiertas, no puede ser hecha, sin embargo, el uso de la ecuación (5.40) para una subestación abierta, resulta en estimaciones conservadoras del voltaje de aguante de coordinación al impulso de rayo o del rango de protección, y una reducción de la relación A/n a la mitad del valor utilizado para subestaciones abiertas es aún recomendable, [3], [6], [9], [18], [19], [20], [22], [24], [26].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 5.2 Factor A para varias líneas aéreas

Tipo de línea	A (KV)
Líneas de distribución (flameo fase a fase)	
cruceta aterrizada (flameo a tierra a bajo voltaje)	900
líneas poste de madera (flameo a tierra a alto voltaje)	2700
Líneas de transmisión (flameo de una fase a tierra)	
un conductor por fase	4500
dos conductores por fase	7000
cuatro conductores por fase	11000
seis y ocho conductores por fase	17000

Máximo valor supuesto de sobretensiones representativas por descargas atmosféricas

Para subestaciones nuevas, en donde el comportamiento del aislamiento ante el rayo de subestaciones existentes es conocido, el máximo valor supuesto de la sobretensión representativa, puede estimarse mediante:

$$\frac{U_{rp2}}{U_{pl2}} = 1 + \left[\frac{n_1 L_2}{n_2 L_1} \frac{U_{pl1}}{U_{pl2}} \left(\frac{U_{rp1}}{U_{pl1}} - 1 \right) \right] \quad (5.36)$$

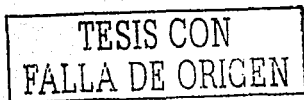
en donde:

- U_{rp} máximo valor asumido de la sobretensión representativa;
- U_{pl} nivel de protección al impulso de rayo del apartarrayos;
- n número mínimo de líneas aéreas en servicio, conectadas a la subestación;
- L distancia entre el apartarrayos y el objeto protegido (m).

El subíndice 1 se refiere a la situación para la cual la experiencia operativa ha sido satisfactoria, y el subíndice 2 a la situación de la subestación nueva.

El máximo valor supuesto se puede obtener considerando el índice de la ecuación (5.32) igual a cero, quedando:

$$U_{rp} = U_{pl} + \frac{A L}{n L_{sp}} \quad (5.37)$$



Distancias en aire para asegurar una instalación con tensión de aguante de impulso especificada

De acuerdo con IEC 71, en instalaciones mayores como las subestaciones es necesario asegurar que la rigidez dieléctrica sea adecuada; las tensiones de aguante de impulso por maniobra y por rayo en aire y en condiciones atmosféricas normalizadas, deben ser iguales o mayores que las tensiones de aguante normalizadas de impulso por rayo o de maniobra normalizadas; las distancias mínimas en aire especificadas para diferentes configuraciones de electrodos, están determinadas con un criterio aproximado tomando en cuenta la experiencia, la economía y dimensiones de equipos utilizados en la práctica, para distancias en aire menores a 1 m. [19].

Estas distancias se consideran únicamente para fijar los requerimientos de la coordinación de aislamiento, los requerimientos de seguridad pueden dar como resultado distancias en aire substancialmente mayores; las Tablas 5.3, 5.4 y 5.5, proporcionan distancias en aire mínimas que aseguran el nivel de aislamiento especificado para aplicación general

Dichas distancias podrán ser menores si han sido verificadas mediante pruebas en configuraciones reales o similares a aquellas que han cumplido con las tensiones de aguante normalizadas de impulso, tomando en cuenta todas las condiciones ambientales relevantes, las cuales pueden crear irregularidades en las superficies de los electrodos, como lluvia, contaminación, etc.

Las distancias en aire también pueden ser menores, donde se haya confirmado por la experiencia en operación, que las sobretensiones son menores a las esperadas en la selección de las tensiones de aguante normalizadas o que la configuración de electrodos es más favorable a la supuesta para las distancias en aire recomendadas.

La Tabla 5.3 correlaciona las distancias mínimas en aire con la tensión de aguante normalizada de impulso por rayo, para configuraciones de electrodos del tipo punta-estructura y del tipo conductor-estructura, para la gama II; estas son aplicables a distancias en aire de fase a tierra así como para distancias en aire entre fases.

La Tabla 5.4 correlaciona las distancias mínimas en aire para configuraciones de electrodos del tipo conductor-estructura y del tipo punta-estructura con la tensión de aguante al impulso por maniobra normalizada de fase a tierra; la configuración conductor-estructura cubre una amplia gama de las configuraciones usadas normalmente.

La Tabla 5.5 correlaciona las distancias mínimas en aire para configuraciones de electrodos del tipo conductor-conductor y del tipo punta-conductor con la tensión de aguante normalizada al impulso por maniobra de fase a fase, la configuración asimétrica punta-conductor es la peor configuración de electrodos que

se encuentra normalmente en servicio; la configuración conductor-conductor cubre a todas las configuraciones simétricas con formas de electrodos similares en las dos fases [19].

Tabla 5.3.- Correlación entre las tensiones de aguante normalizadas de impulso por rayo y las distancias mínimas en aire. Referencia IEC 71

Tensión de aguante normalizada de impulso por rayo (kV)	Distancias mínimas en aire (mm)	
	Punta-estructura	Conductor-estructura
20	60	
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	
170	320	
250	480	
325	630	
450	900	
550	1100	
650	1300	
750	1500	
850	1700	1600
950	1900	1700
1050	2100	1900
1175	2350	2200
1300	2600	2400
1425	2850	2600
1550	3100	2900
1675	3350	3100
1800	3600	3300
1950	3900	3600
2100	4200	3900

NOTA – El impulso normalizado por rayo es aplicable para distancias de fase a fase y de fase a tierra.

Para fase a tierra, es aplicable la distancia mínima en aire para conductor-estructura y punta-estructura.

Para fase a fase, es aplicable la distancia mínima en aire para punta-estructura.

Tabla 5.4.- Correlación entre las tensiones de aguante normalizadas de impulso por maniobra y las distancias mínimas en aire de fase a tierra. Referencia IEC 71.

Tensión de aguante normalizada de impulso por maniobra (kV)	Distancias mínimas en aire de fase a tierra (mm)	
	Conductor - estructura	Punta -estructura
750	1600	1900
850	1800	2400
950	2200	2900
1050	2600	3400
1175	3100	4100
1300	3600	4800
1425	4200	5600
1550	4900	6400

Tabla 5-5.- Correlación entre las tensiones de aguante normalizadas de impulso por maniobra y las distancias mínimas en aire de fase a fase. Referencia IEC 71.

Tensión de aguante normalizada de impulso por maniobra			Distancias mínimas en aire de fase a fase (mm)	
Fase a tierra kV	Valor fase a fase	Fase a fase kV	Conductor-conductor paralelo	Punta-conductor
	Valor fase a tierra			
750	1.5	1125	2300	2600
850	1.5	1275	2600	3100
850	1.6	1360	2900	3400
950	1.5	1425	3100	3600
950	1.7	1615	3700	4300
1050	1.5	1575	3600	4200
1050	1.6	1680	3900	4600
1175	1.5	1763	4200	5000
1300	1.7	2210	6100	7400
1425	1.7	2423	7200	9000
1550	1.6	2480	7600	9400

Las distancias en aire, aplicables en servicio, están determinadas de acuerdo a las siguientes reglas:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Gama 1.

La distancia en aire de fase a tierra y fase a fase, se determina de la Tabla 5.3 para la tensión de aguante nominal de impulso por rayo; la tensión de aguante normalizada de corta duración a la frecuencia del sistema puede despreciarse, cuando la relación entre el impulso de rayo normalizado con respecto a la tensión de aguante normalizada de corta duración a la frecuencia del sistema sea mayor de 1.7.

Gama 2.

La distancia en aire de fase a tierra, es el valor más alto de las distancias determinadas para la configuración punta-estructura de la Tabla 5.3 para el impulso de rayo normalizado y de la Tabla 5.4 para las tensiones de aguante normalizadas al impulso por maniobra respectivamente.

La distancia en aire de fase a fase, es el valor más alto de las distancias determinadas para la configuración punta-estructura de la Tabla 5.3 para el impulso de rayo normalizado y de la Tabla 5.5 para las tensiones de aguante normalizadas al impulso por maniobra respectivamente.

Los valores son válidos para altitudes las cuales han sido consideradas en la determinación de las tensiones de aguante requeridas.

Para el aislamiento longitudinal en la gama II, las distancias en aire necesarias para soportar la tensión de aguante normalizada de impulso por rayo, puede obtenerse agregando 0.7 veces la tensión pico máxima de operación de fase a tierra al valor normalizado y dividiendo la suma por 500 kV/m.

Las distancias en aire necesarias para la tensión de aguante normalizada longitudinal de impulso por maniobra en la gama II son menores que las que corresponden al valor de fase a fase; tales distancias generalmente existen solo en aparatos prototipo probados y por lo tanto no se normalizan valores mínimos, [3], [6], [9], [18], [19], [20], [22], [24], [26].

Cálculo de la ruptura dieléctrica de claros en aire, a partir de datos experimentales

El objetivo de este análisis no es el de proporcionar información para que se estime el tamaño del equipo y la rigidez dieléctrica de claros en aire, con el propósito de determinar el factor de corrección atmosférico; las fórmulas que aquí se proporcionan, están basadas en datos experimentales, con el propósito de la coordinación de aislamiento; para distancias mayores a 1 m, se puede suponer que dichas fórmulas dan un ajuste aproximado a los resultados experimentales.

Los valores dados en las tablas 5.3, 5.4, 5.5 no corresponden a la U_{50} sino a las condiciones de aguante e incluyen consideraciones adicionales tales como la factibilidad, economía, experiencia y condiciones ambientales (contaminación, lluvia, insectos, etc.); pueden existir discrepancias particularmente significativas para distancias menores a 1 m, donde la precisión de las fórmulas es incierta.

Respuesta del aislamiento a las tensiones a la frecuencia del sistema.

Para la ruptura de claros en aire bajo tensión a la frecuencia del sistema, la tensión de aguante más baja se obtiene para la configuración punta-plano y la tensión de ruptura 50% con d hasta 3m, se puede aproximar por la siguiente ecuación:

$$U_{50RP} = 750 \sqrt{2} \ln \left(1 + 0,55 d^{1,2} \right) (\text{kV cresta, m}) \quad (5.38)$$

El valor pico de U_{50RP} bajo tensión a la frecuencia del sistema, es aproximadamente 20-30% mayor que el valor correspondiente bajo impulso por maniobra positivo con tiempo de frente crítico; el aguante se puede tomar como el 90% de U_{50} , basado en una desviación convencional supuesta de 3% de U_{50} .

La influencia de la configuración del claro en aire sobre la rigidez, generalmente es menor bajo tensión a la frecuencia del sistema que para impulso por maniobra:

- Es muy pequeña para claros en aire hasta de 1 m de espaciamiento
- Para claros en aire mayores a 2 m, la rigidez puede evaluarse de acuerdo a la siguiente ecuación (aplicable a condiciones en seco):

$$U_{50} = U_{50RP} \left(1,35 K - 0,35 K^2 \right) \quad (5.39)$$

Donde K es el factor de entrehierro (determinado de pruebas de impulso por maniobra) cómo se muestra en la tabla 5.6.

- Para claros en aire entre 1m y 2m, se puede utilizar la fórmula (5.38) con el conocimiento de que los resultados son conservadores.

Cuando están presentes aisladores, la tensión de flameo puede disminuir sustancialmente con respecto al caso de referencia, especialmente en condiciones de alta humedad.

En general, las descargas bajo tensión a la frecuencia del sistema, condiciones normales de operación y sobretensiones temporales, pueden ser causadas por reducciones excepcionales en el aguante de la rigidez del aislamiento

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

debido a condiciones ambientales severas o por envejecimiento de las propiedades del aislamiento del equipo.

La influencia de la lluvia en los claros en aire, especialmente para configuraciones que tienen la rigidez más baja, es despreciable; sin embargo, la lluvia puede reducir la rigidez dieléctrica externa de los aisladores, especialmente para aisladores tipo poste con distancias pequeñas entre faldones; el grado de reducción depende de la cantidad de lluvia, configuración del aislador y de la conductividad del agua.

La lluvia combinada con la contaminación, pueden reducir drásticamente la rigidez del aislamiento; la peor condición, generalmente es ocasionada por niebla o lluvia ligera combinadas con aisladores contaminados; estas condiciones pueden dictar el diseño del aislamiento externo; se pueden simular niveles de contaminación del aislamiento comparativos por medio de la densidad equivalente de sal depositada (DESD) en gramos por metro cuadrado de NaCl. La DESD relaciona la conductividad en estado estable del contaminante disuelto con la cantidad de NaCl disuelta; la determinación de la DESD requiere un análisis ya sea del comportamiento del aislamiento existente en el área o de datos estadísticos obtenidos de investigaciones en el sitio.

Lo más deseable puede ser el análisis del comportamiento existente, pero esto no proporciona suficiente información si el aislamiento existente no presenta flameos por contaminación; el análisis de datos estadísticos, requiere de algunos años de monitoreo en sitio ya que los datos se obtienen por medición directa de la DESD, lavando los aisladores expuestos o por otros métodos, por ejemplo, medición de corriente de fuga, análisis químico o mediciones de conductividad.

La descripción estadística de las condiciones ambientales, generalmente requiere una mayor cantidad de datos y es aún más difícil la descripción estadística del envejecimiento; por lo tanto, los procedimientos estadísticos no se recomiendan en estimación de la respuesta del aislamiento bajo tensiones a la frecuencia del sistema.

Respuesta del aislamiento a sobretensiones de frente lento

Bajo esfuerzos de disturbios de frente lento, un aislamiento autorecuperable presenta tensiones de aguante apreciablemente menores que para disturbios de frente rápido de la misma polaridad: como resultado de numerosas pruebas con impulsos por maniobra, los claros en aire pueden caracterizarse por la rigidez mínima observada para el tiempo de cresta crítico, en función de las características geométricas del entrehierro en aire, las cuales son principalmente el espaciamiento d (en metros) y la configuración de los electrodos. Entre los diferentes entrehierros con espaciamiento d , el entrehierro punta-plano esforzado con polaridad positiva tiene la rigidez más baja y se utiliza como referencia; para entrehierros punta-plano de longitudes hasta 25 m, los datos experimentales de la rigidez para polaridad positiva y tiempo de frente crítico pueden aproximarse razonablemente por:

$$U_{50RP} = 1080 \ln(0,46 d + 1) \quad (\text{kV cresta}) \quad (5.40)$$

Para impulsos por maniobra normalizados, la formula siguiente proporciona una mejor aproximación [IEC]:

$$U_{50RP} = 500 d^{0,6} \quad (\text{kV cresta}) \quad (5.41)$$

Las fórmulas (5.40) y (5.41) son aplicables a nivel de mar ($H=0$), por lo tanto, se requiere corrección por altitud cuando se aplique el procedimiento de coordinación de aislamiento [19].

Los aisladores entre el entrehierro en aire, generalmente disminuyen el valor de ruptura de la rigidez a impulsos de frente lento de polaridad positiva; para aisladores de suspensión secos, la influencia es pequeña pero puede ser importante en el caso de aisladores tipo columna.

Para otras configuraciones, se aplican los factores de entrehierro indicados en la tabla 5.6 como sigue:

$$U_{50} = KU_{50RP} \quad (5.42)$$

Obsérvese que para $K \geq 1,45$, la tensión de ruptura para polaridad negativa puede llegar a ser menor que para polaridad positiva.

De manera similar, se aplica un factor de entrehierro para configuraciones fase-fase, sin embargo, en este caso, el factor de entrehierro está influenciado por la configuración y por la relación α , definida como el cociente del pico de la componente negativa entre la suma de los picos de las componentes positiva y negativa; en la tabla 5.6 se indican valores típicos de factores de entrehierro para geometrías fase-fase más usuales para $\alpha=0,5$ y $\alpha=0,33$.

Respuesta del aislamiento a sobretensiones de frente rápido

En una configuración punta-plano, el gradiente de ruptura para impulsos de frente rápido de polaridad negativa es mucho mayor que para los de polaridad positiva; más aún, cuando se grafica la rigidez contra el espaciamiento del entrehierro, la curva resultante es no lineal para polaridad negativa y para polaridad positiva lineal; para impulsos de rayo normalizados aplicados a electrodos punta-plano con espaciamientos desde 1m hasta 10 m, los datos experimentales de la rigidez para polaridad positiva pueden aproximarse mediante:

$$U_{50RP} = 530 d \quad (\text{kV cresta}) \quad (5.43)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En general, los factores de entrehierro aplicables a impulso por maniobra no son directamente aplicables para la rigidez a impulsos por rayo, sin embargo, los resultados experimentales han demostrado que para polaridad positiva, el gradiente de ruptura para cualquier entrehierro en aire en por unidad del gradiente de ruptura de punta-plano, se incrementa linealmente para un factor de entrehierro para impulsos por maniobra de polaridad positiva; el factor de entrehierro K_{ff}^+ para impulsos de frente rápido por rayo de polaridad positiva, puede aproximarse en términos del factor de entrehierro para impulso por maniobra como sigue:

$$K_{ff}^+ = 0,74 + 0,26K \quad (5.44)$$

Para calcular la magnitud de los disturbios que inciden en la subestación, es necesario estimar el gradiente de ruptura con polaridad negativa de las cadenas de aisladores en las líneas aéreas, mediante la siguiente fórmula:

$$U_{50} = 700 d \quad (\text{kV cresta}) \quad (5.45)$$

Las fórmulas (5.43) y (5.45) son aplicables a nivel de mar ($H=0$); por lo tanto, se requiere corrección por altitud cuando se aplique el procedimiento de coordinación de aislamiento.

Para configuraciones como conductor-estructura superior y conductor-cruceta, la influencia de los aisladores sobre la rigidez es despreciable, de manera que para tales configuraciones la rigidez es muy cercana a la de los entrehierros en aire.

Para entrehierros en aire, la desviación convencional es de aproximadamente 3% de U_{50} para impulsos positivos y aproximadamente 5% de U_{50} para impulsos negativos; cuando están presentes aisladores, la desviación convencional se incrementa, alcanzando un máximo de 5% a 9% en relación con casos que presentan la mayor reducción de U_{50} ; en otros casos, es aplicable un valor cercano al correspondiente a entrehierros en aire; la influencia de la lluvia sobre la tensión de flameo es generalmente secundaria, tanto en el caso de entrehierros en aire como en el de cadenas de aisladores.

Para sobretensiones de frente rápido, el tiempo a la ruptura está marcadamente influenciado por la amplitud del impulso aplicado en relación a la tensión de ruptura; para impulsos cercanos al valor de U_{50} , los flameos se presentan en la cola del impulso normalizado; a medida que la amplitud se incrementa, el tiempo al flameo disminuye dando lugar a la curva tensión-tiempo, [3], [6], [9], [18], [19], [20], [22], [24], [26].

- Factores de entrehierro K típicos de ruptura impulso por maniobra fase-tierra

TABLA 5.6.- Factores de entrehierro típicos, geometrías fase-fase

Configuración	$\alpha=0,5$	$\alpha=0,33$
Anillo-Anillo o electrodos grandes y lisos	1,80	1,70
Cruce de conductores	1,65	1,53
Punta-Punta o Conductor-Conductor (a lo largo del claro)	1,62	1,52
Soporte de barras (herrajes)	1,50	1,40
Geometrías asimétricas	1,45	1,36

NOTA.- De acuerdo a (1) y (4)

Coordinación de aislamiento

La actividad que se encarga de homologar los efectos de las sobretensiones con los medios disponibles para contrarrestarlas se conoce como "coordinación de aislamiento"; dicha actividad tiene por objeto correlacionar los efectos producidos por las sobretensiones y los medios de protección de las mismas [3].

La coordinación de aislamiento de las instalaciones eléctricas se inicia desde el dimensionamiento de las instalaciones mismas, para lo cual es necesario tomar en cuenta una serie de eventos que regulan o afectan de alguna manera el comportamiento de los sistemas eléctricos.

Proteger un sistema eléctrico contra sobretensiones es realmente un problema de economía, en el cual es posible elegir un criterio de sobretensiones contra descargas atmosféricas, o un criterio de protección contra sobretensiones por condiciones de operación normales, y debido a que ambos son poco realistas es conveniente considerar la posibilidad de presencia de eventos simultáneos, o simplemente los no tomados en cuenta.

El objetivo de la coordinación de aislamiento es diseñar el aislamiento de los sistemas de potencia con todos sus componentes, de tal manera que se minimice el riesgo para el equipo y las interrupciones de servicio, como una consecuencia de operación en estado estable, dinámico y transitorio de la manera más económica; para lograr estos objetivos es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1.- Tomar en cuenta la magnitud de las descargas atmosféricas, los efectos de las maniobras súbitas de interrupción, etc. a que el equipo de los sistemas eléctricos pueda ser sometido así como su frecuencia de ocurrencia; es sumamente importante

investigar tan profundamente como sea posible el comportamiento de las ondas entre los componentes del sistema.

2.- Identificar claramente la capacidad de los dieléctricos: sólidos, líquidos o gaseosos de los equipos del sistema, para soportar los esfuerzos a que se verán sometidos durante los transitorios, para poder preservar la integridad del sistema.

3.- Seleccionar los elementos de protección capaces de eliminar o reducir los efectos de las sobretensiones.

4.- Analizar las condiciones de operación y de ser posible establecer reglamentos que hagan posible reducir los efectos de las sobretensiones temporales

5.- El costo de los diferentes desarrollos o estrategias aplicados para la solución de los puntos anteriores deberá ser una adecuada solución económica.

Para lograr buenos resultados de una coordinación de aislamiento es necesario tomar en cuenta además, los siguientes puntos [3]:

1.- Elegir el criterio de diseño de la coordinación de aislamiento.

2.- Dimensionar adecuadamente las estructuras de las estaciones, subestaciones y líneas de transmisión, subtransmisión y distribución.

3.- Determinar los niveles cerámicos de las áreas donde se alojaran las instalaciones.

4.- Seleccionar los niveles básicos de aislamiento al impulso y por maniobra (BIL y BSL), correspondientes a los niveles de tensión involucrados y a los criterios de diseño seleccionados

5.- Seleccionar el rango adecuado del apartarrayos

El procedimiento de coordinación de aislamiento actualmente estandarizado en IEC incluye la determinación de los esfuerzos de tensión de cualquier origen en el equipo y la correspondiente rigidez dieléctrica requerida, basada en los márgenes aceptables de protección o los niveles aceptables de comportamiento. La mayoría de estos márgenes (o niveles) son empíricos [19].

De acuerdo a lo descrito en la IEC-71-1 existen cuatro pasos en este procedimiento de coordinación de aislamiento, los cuales se pueden identificar como sigue:

- paso 1: Determinación de las sobretensiones representativas (U_{rp});
- paso 2: Determinación de las tensiones de aguante de coordinación (U_{cw});

- paso 3: Determinación de las tensiones de aguante requeridas (U_{rw});
- paso 4: Determinación de las tensiones de aguante normalizadas (U_w).
- Paso 5: Selección de los niveles de aislamientos normalizados

Estos pasos principales con las ligas asociadas que los relacionan mediante los factores correspondientes, no solamente determinan las tensiones de aguante normalizadas, sino también permiten realizar el cálculo relacionado a los claros fase-tierra y fase-fase cuando es aplicable.

Las sobretensiones representativas no son precisamente las sobretensiones que ocurren en el sistema, sino las sobretensiones que representan el mismo esfuerzo eléctrico en el equipo que las sobretensiones reales; así, si la sobretensión real supuesta tiene una forma de onda diferente a la de prueba, la sobretensión representativa puede ser modificada de manera que las pruebas verifiquen verdaderamente la rigidez del aislamiento.

Para que concuerden los esfuerzos de tensión con la rigidez dieléctrica, se tienen que tomar en cuenta los diversos tipos de esfuerzos y la correspondiente respuesta del aislamiento; esto involucra hacer una distinción entre aislamiento auto-recuperable y aislamiento no-autorecuperable; para el aislamiento no-autorecuperable la coordinación esfuerzo-rigidez se realiza utilizando la metodología determinística mientras que para el aislamiento auto-recuperable, se puede utilizar una metodología estadística cuando sea conveniente [24].

Pasos para la coordinación de aislamiento con apartarrayos de óxidos metálicos

Paso 1: Determinación de las Sobretensiones Representativas Urp.

Las sobretensiones representativas, temporales y de frente lento, se determinan usualmente de estudios del sistema eléctrico mediante analizadores de redes, de transitorios de sistemas eléctricos o por simulación digital o una combinación de ambas; los resultados de tales estudios verifican los valores de las siguientes sobretensiones:

- Sobretensiones a la frecuencia del sistema
- Sobretensiones temporal (r, m, s, de fase a tierra);
- Sobretensiones de frente lento: (valor pico de fase a tierra; método fase-pico)
- Sobretensiones de frente rápido: (valor pico de fase a tierra; método fase-pico)

Paso 2: Determinación de la tensión de aguante de coordinación U_{cw} .

Las tensiones de aguante de coordinación se obtienen aplicando un factor de coordinación (K_c) a las sobretensiones representativas.



El factor a considerar puede ser K_{cd} si se aplica el método determinístico o K_{cs} para el uso del método estadístico; la determinación de las tensiones de aguante de coordinación deberá realizarse para los aislamientos internos de transformadores, interruptores, etc., y para los aislamientos externos por separado.

Ucw para el aislamiento interno.

En este paso, la determinación de U_{cw} para el aislamiento interno se determina para la tensión a la frecuencia del sistema, y las sobretensiones de frente lento y frente rápido.

Ucw para sobretensiones temporales.

Para esta clase de sobretensiones, la tensión de aguante de coordinación es igual a la sobretensión representativa temporal; en otras palabras, el factor de coordinación $K_c = 1$.

Ucw para sobretensiones de frente lento.

Para equipo protegido por apartarrayos, la máxima sobretensión de frente lento y por tanto, la sobretensión representativa de frente lento, es igual al nivel de protección contra impulso de maniobra del apartarrayos.

El valor de la tensión puede ajustarse para el factor de coordinación K_{cd} a fin de considerar las oscilaciones de la distribución estadística en las sobretensiones de frente lento.

Ucw para sobretensiones de frente rápido.

Para equipo protegido por apartarrayos, la máxima sobretensión de frente rápido y por tanto la sobretensión representativa de frente rápido, es igual al nivel de protección contra impulsos de maniobra del apartarrayos.

El valor de la tensión de protección puede ajustarse para el factor de coordinación K_{cd} a fin de considerar las oscilaciones de la distribución estadística en las sobretensiones de frente rápido como se procedió para el caso de sobretensiones de frente rápido.

De aquí se determina la tensión de aguante de coordinación para disturbios de frente rápido.

Ucw para Aislamiento Externo

La determinación de la tensión de aguante de coordinación para aislamiento externo, se lleva a cabo para sobretensiones de frente lento, usando el método estadístico debido a la naturaleza del aislamiento.

Un método estadístico puede aplicarse también a las sobretensiones de frente rápido, pero esto generalmente no es necesario para tensiones en el rango II.

Ucw para Sobretensiones de Frente Rápido

La determinación de la tensión de aguante de coordinación para sobretensiones de frente rápido no es necesaria, ya que la tensión de aguante al impulso por rayo en las distancias en aire mínimas, que resultan a partir de las tensiones de aguante al impulso por maniobra, serán más grandes que las que resultan solamente de utilizar las tensiones de aguante al impulso de rayo requeridas por el aislamiento no autorrecuperable.

Paso 3: Determinación de las tensiones de aguante requeridas - valores de Urw

La tensión de aguante requerida, se obtiene aplicando un factor de seguridad K_s a la tensión de aguante de coordinación, los valores de K_s están dados como:

- Para el aislamiento interno: $K_s = 1,15$
- Para el aislamiento externo: $K_s = 1,05$

Para el aislamiento externo también se aplica un factor de corrección atmosférico K_a .

Paso 4: Conversión a Tensiones de Aguante al Impulso por maniobra (SIW).

Las Tensiones de Aguante de corta duración a la frecuencia del sistema se convierten a tensiones de aguante de impulso por maniobra equivalentes (SIW) de acuerdo a la tabla correspondiente, tanto para aislamiento interno como para aislamiento externo.

Paso 5: Selección de los Niveles de Aislamiento Normalizados

Las tensiones de aguante normalizadas U_w se obtienen a partir de las tensiones de aguante requeridas, seleccionando el valor más alto siguiente de la lista de valores normalizados en la IEC 71-1. [3], [6], [9], [18], [19], [20], [22], [24], [26].

Los apartarrayos de óxidos metálicos son los elementos de protección por excelencia, fundamentales contra las sobretensiones de los sistemas eléctricos, sin embargo existen una gran cantidad de medidas estratégicas, a través de las cuales es posible controlar los efectos de las sobretensiones, sobretodo las derivadas de la operación de los sistemas.

La simulación digital es uno de los recursos tecnológicos actuales más importantes en el análisis de las sobretensiones, que nos permiten obtener una mayor precisión de los resultados, y determinar las variables de interés en el comportamiento de las sobretensiones de los sistemas eléctricos,

En este trabajo se simularon cuatro casos de sobretensiones a que son sometidos los sistemas eléctricos, siendo algunas de las conclusiones obtenidas las siguientes:

En el primer caso de la energización de una línea de transmisión larga de alta tensión, se plantearon tres alternativas de cierre de su interruptor, para analizar el grado de distorsión y la atenuación correspondiente de la tensión en cada una de ellas; en la primera alternativa la maniobra se realizó empleando interruptores convencionales y sin apartarrayos, en la segunda alternativa empleando interruptores con resistencias de preinserción y sin apartarrayos, y en la tercera alternativa empleando interruptores convencionales y con apartarrayos; en las tres alternativas obtuvimos gráficas de sobretensiones con diferentes grados de atenuación mediante tres procedimientos diferentes.

En la primera alternativa, empleando interruptores convencionales (sin resistencias de preinserción y sin apartarrayos), la sobretensión en la subestación de 400 kV en donde se realiza la maniobra, se elevó cerca del 50%, fig. 4.3; mientras que en el extremo opuesto de la línea, la sobretensión se va prácticamente al doble, lo cual corrobora lo tratado en la referencia [24], [33] y [40] fig. 4.-4; distorsionando las ondas de sobretensión en ambos extremos pero con mas intensidad en el opuesto a la maniobra; las gráficas 4.3 y 4.4 corresponden a la graficación de voltaje de las tres fases de la línea, las ondas de las figuras 4.5 y 4.6 a la graficación del voltaje fase 1.

En la segunda alternativa empleando interruptores con resistencias de preinserción, sin apartarrayos en los extremos de la línea, el comportamiento de la sobretensión fue mas controlado, lo cual puede observarse en las gráficas de voltaje de los extremos de la maniobra fig. 4.7; en la cual se aprecia una sobretensión de menos de 20% en el extremo en donde se realizó la maniobra, y en el extremo opuesto al de maniobra fig. 4.8; en donde la sobretensión es del orden del 50%, siendo la distorsión en este caso considerablemente menor que en el anterior.

En la tercera alternativa en la que se emplearon interruptores convencionales (sin resistencias de preinserción) e instalando apartarrayos en los extremos de la línea, el comportamiento de la sobretensión durante la energización

CONCLUSIONES

Las sobretensiones de los sistemas eléctricos son fenómenos, tanto de origen atmosférico, como de las condiciones de operación de los sistemas eléctricos, que deterioran los aislamientos de los mismos, reduciendo notablemente la vida de los equipos que los constituyen.

Los efectos de las sobretensiones someten a los aislamientos de los equipos que constituyen a los sistemas eléctricos, a una serie de esfuerzos que permiten diferenciarlos según los tipos de las sobretensiones a que son sujetos, mediante sus correspondientes factores de sobretensión; los cuales pueden ser empleados en combinación con los voltajes normalizados, para determinar los niveles de sobretensión que los elementos de los sistemas pueden alcanzar.

Las sobretensiones por descargas atmosféricas y por maniobra de interruptores, que si bien son las más severas en intensidad y de acuerdo con IEC caen dentro de la clasificación de sobretensiones transitorias, cuyos tiempos de operación son del orden de los microsegundos, probablemente no necesariamente causan los efectos más severos; ya que las sobretensiones de operación continua de baja frecuencia, cuyos rangos de sobretensión van desde valores arriba de la tensión máxima de operación continua en adelante, que dependerá del tipo de sobretensión, y de su duración, desde algunos ciclos, hasta algunas horas, y que debido a que su presencia es casi permanente; en voltaje-tiempo probablemente representan un efecto notablemente mayor que el de las sobretensiones producidas por otras causas.

Las sobretensiones de baja frecuencia temporales forman parte sustancial de la operación de los sistemas eléctricos, que como se describió en su análisis operan a frecuencias cercanas a la frecuencia fundamental, con tiempos de frente de entre 30 y 500 ms y tiempos de duración de .03 a 3600 s, y aunque no necesariamente causan la operación de los interruptores asociados a los equipos que las producen, sus causas son tan diversas y sus tiempos de duración tan prolongados que producen grandes daños a los aislamientos; que se ven sometidos a sobretensiones con frecuencias cercanas a la fundamental, pero con tiempos de duración considerablemente mayores, sobretodo cuando se presentan combinadas entre si o con las de otro tipo; por lo que también deberán ser tomadas en cuenta durante los procesos de simulación.

Las sobretensiones de operación continua de baja frecuencia, que corresponden a las sobretensiones cuya frecuencia de operación es la fundamental (50 o 60 cps) según el sistema, y sus tiempos de duración que van desde algunos minutos hasta horas con valores arriba de la tensión máxima de operación continua que dependerán básicamente de la forma de operación del sistema; sin embargo en muchos de estos representan un número sustancialmente mayor de eventos que el de otros tipos de sobretensiones.

de la línea como puede observarse en la fig. 4.9, es ligeramente menor que en el primer caso, tanto en el extremo de maniobra como en el de recepción correspondiente, siendo la distorsión de la onda un poco más prolongada; una comparación entre la segunda y tercera alternativas, indicará que la segunda es más conveniente.

Una alternativa adicional a las tres anteriores es la de considerar la posibilidad de contar con un transformador de potencia o un reactor instalado en el extremo receptor para compensar la línea, como en el caso 2 en donde se realiza la simulación de la energización de un transformador de potencia en vacío, a través de una línea de transmisión de 400kV, en la cual observamos que durante la maniobra de energización de la línea no existen sobretensiones apreciables en las barras de ninguna de las dos subestaciones; además de que la distorsión es prácticamente nula, fig. 4.13 y 4.14. Una simple comparación de estas gráficas con las gráficas de la línea tratada en la alternativa 2 del caso 1, de energización con interruptores con resistencias de preinserción, mostrada en las figs. 4.7 y 4.8, que fue la mejor de las tres alternativas del caso 1, nos indicará, que de no existir otros elementos que considerar, que la alternativa del caso 2 de energización una línea de alta tensión con un transformador de potencia conectado en el extremo opuesto es la más recomendable.

El caso 3 consistió en la simulación de la energización de dos bancos de capacitores de 9 y 6 MVAR respectivamente, siendo energizados primero en forma independiente, y posteriormente uno a continuación del otro, e intercambiando capacidades durante los cierres combinados y obteniendo las gráficas mostradas en las figuras 4.19 a 4.27, durante las cuales obtuvimos los siguientes resultados:

La energización de los bancos de capacitores de 9 y 6 MVAR con sus respectivos interruptores en el lado de 13.8 kV, en forma independiente fue muy semejante en ambos casos en el lado de 230 kV, alcanzando en el primer caso una sobretensión máxima de 207 kV, después de 20 mseg distorsionándose las ondas de tensión durante prácticamente todo el periodo de prueba pero en forma relativamente leve, debido a la impedancia del transformador no existiendo una variación notable entre ellas, fig. 4.19 y 4.22 correspondientes a ambos capacitores de 6 y 9 MVARs.

La energización en el lado de 13.8 kV tuvo una sobretensión de 22.18 kV a los 20 mseg en el bus de la fase C y una distorsión mucho más notable, que permaneció durante todo el periodo de análisis de 100 mseg, manifestando una muy pequeña tendencia de atenuación fig. 4.20 y 4.23.

En el caso de las corrientes observamos que el banco de capacitores de 9 MVAR alcanza, durante la energización, una corriente máxima de aproximadamente 5 kA, después de 10 mseg, mientras que en el de 6 MVAR se alcanzó una corriente máxima de 3.107 kA a los 18 mseg en la fase C del capacitor, distorsionándose ambas con una leve atenuación durante el periodo de análisis, fig. 4.21 y 4.24.

Para el caso de la energización de ambos bancos de capacitores espalda con espalda, en el comportamiento del voltaje en el lado de 230 kV, no se aprecia sobretensión, presentándose una pequeña distorsión de la onda de tensión, pero incluso menos severa que en los casos de energización de los bancos en forma independiente, corrigiéndose ésta prácticamente dentro del periodo de prueba, fig. 4.25.

En el nodo de 13.8 kV la sobretensión durante la maniobra de los bancos de capacitores de 6 MVAR, y posteriormente 9 MVAR., es bastante menor que el 200%, menor que la obtenida en las dos primeras alternativas en las que fue conectado solo un banco a la vez y se distorsiona sensiblemente menos que cuando se energizaron los bancos en forma independiente, pero la distorsión también se mantiene todo el periodo de análisis, ver fig. 4.26.

Por otro lado la corriente para la condición de energización de los bancos de capacitores espalda con espalda alcanzó un valor máximo de más de 15 kA, más que la suma de las corrientes que se obtuvieron en la energización de los bancos conectados en forma independiente, casi 2 p.u atenuándose con mayor rapidez, en tan sólo 30 milisegundos, como lo muestra la figura 4.27, lo cual corrobora lo indicado en la referencia [3].

Respecto al caso 4 de la sobretensión por la descarga atmosférica de 500 kV, $1.2/50\mu s$ en el reactor del neutro de un banco de capacitores, instalado en las barras de baja tensión de un transformador de distribución, cuyo secundario se encuentra conectado en estrella de igual modo que el banco de capacitores, tenemos los siguientes comentarios:

La sobretensión alcanza su valor máximo de 800 kV negativos en el bus del reactor, manifestándose sobretensiones ligeramente menores en el banco de capacitores y en las barras de distribución; atenuándose paulatinamente durante el periodo de prueba al 50 % de su valor, presentando un nuevo efecto de descarga de polaridad positiva a los $50\mu s$ de aproximadamente 600 kV, que se recupera instantáneamente su valor anterior fig. 4.29.

Las figuras 4.30 y 4.31 nos muestran la onda de sobretensión en el mismo nivel de tensión, existiendo nuevamente una tendencia de elevación del potencial muy semejante en las tres ondas, presentándose la máxima sobretensión en el bus del reactor el que alcanzó un valor máximo de 261.4 kV decreciendo paulatinamente hasta un valor de -83.67 kV, en donde nuevamente se presentó un transitorio que llevó hasta un valor de -320.5kV, mientras que en el capacitor y en el bus de distribución se alcanzaron máximos de -342.2 kV y 333.3 kV respectivamente.

Las figuras 4.32 y 4.33 muestran el efecto de la onda de sobretensión por la descarga atmosférica en el reactor del banco de capacitores, pero ahora en los buses 1, 2, y 3. de lado de 230 kV, amortiguado por la impedancia del banco de

transformadores de la subestación, existiendo nuevamente una tendencia de elevación del potencial muy semejante, la fig. 4.34 y 4.35 muestra los efectos de la sobretensión en el neutro del banco de capacitores y el impulso de la descarga reproducida respectivamente.

Durante el dimensionamiento de los aislamientos de los interruptores de las líneas y equipos de transmisión, se deben tomar en cuenta las sobretensiones transitorias por maniobras de interruptor, debido a que a partir de los niveles de extra alta tensión estos eventos son más severos y tienen una alta probabilidad de ocurrencia y se correría un gran riesgo para la preservación de los aislamientos no considerarla.

Debido a que las sobretensiones por descargas atmosféricas y por maniobras de interruptores son las más severas en intensidad, y de acuerdo con IEC, son de sobretensiones transitorias, cuyos tiempos de operación son de μs , las hacen uno de los eventos más importantes a considerar.

Para reducir la dificultad existente para determinar la combinación de los parámetros de operación y la máxima sobretensión mediante los métodos de análisis convencionales, es conveniente realizar simulaciones de una adecuada cantidad de casos, como operaciones de maniobra de interruptor con diferentes tiempos de cierre y con variación de algunos de sus parámetros para establecer una distribución estadística de los transitorios correspondientes.

Ya que las sobretensiones de operación continua a baja frecuencia, cuyos rangos de sobretensión van desde arriba de la tensión máxima de operación continua en adelante, que dependerá del tipo de sobretensión, y de duración desde algunos ciclos hasta algunas horas, y que su presencia es casi permanente en voltaje-tiempo, probablemente representan un efecto mayor que el de las sobretensiones más convencionales, aunque de cualquier manera deben ser tomadas en cuenta en los procedimientos de coordinación de aislamiento.

En el dimensionamiento de los aislamientos de los interruptores de las líneas y equipos de transmisión, se deben tomar en cuenta las sobretensiones transitorias por maniobra de interruptor, debido a que a partir de los niveles de extra alta tensión, estos eventos son más severos y tienen una alta probabilidad de ocurrencia, por lo que se correría un gran riesgo para la preservación de los aislamientos no considerarla.

145
1950

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFIA

- 1.- A BARGIGIA, CARLO BOATO, RENATO TONON
APPLICATIONS OF ARRESTERS ON DISTRIBUTION NETWORKS PRESENT
SITUATION AND FUTURE TRENDS
- 2.- A BARGIGIA, M NIGRIS, A PIGINI, A SIRONI AND COLOGNO M.
COMPARISON OF DIFFERENT TEST METHODS TO ASSES THE THERMAL
STRESSES OF METAL OXIDE SURGE ARRESTERS UNDER POLLUTION
CONDITIONS ENE 93
- 3.- ALLAN GREENWOOD
ELECTRICAL TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS 2ND EDITION
JOHN WILEY
- 4.- ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM RULE BOOK
- 5.- A MIZUKOSHI, S MARUYAMA, K NAKANO, K SAITO, G St JEAN, Y LATOUR
AND A PETIT
PRESSURE RELIEF DESIGN AND PERFORMANCE OF METAL OXIDE SURGE
ARRESTERS 86
- 6.- A R HILEMAN, J ROGUIN, K H WECK
PROTECTION PERFORMANCE OF METAL OXIDE SURGE ARRESTERS
CIGRE
- 7.- ASEA ZINK-OXIDE SURGE ARRESTERS TYPE XAP, XAM
- 8.- B BACHMANN AND SCHEI
PERFORMANCE OF METAL OXIDE SURGE ARRESTERS UNDER OPERATING
VOLTAJE
CIGRE
- 9.- BERGER, ANDERSON, KRONINGER
PARAMETERS OF LIGHTNING FLASHES WORKING GROUP 33
ELECTRA No 41
- 10.- BRITO BRITO FERNANDO, RAUL VELAZQUEZ SANCHEZ
OBTENCION DE UN MAPA DE ISODENSIDAD DE RAYOS A TIERRA DE LA
REPUBLICA MEXICANA 1983 1989 JUL 90
- 11.- C H SHIH, R M HAYES, D K NICHOLS, R E KOCH, J A TIMOSHENKO, J C
ANDERSON
APPLICATIONS ON SPECIAL ARRESTERS ON 138 kV LINES OF
APPALACHIAN POWER COMPANY OCT 85

- 12.- C ROMUALDO, A RODRIGUEZ Y F DE LA ROSA.
DIGITAL SIMULATION OF ZINK OXIDE ARRESTERS ON DISTRIBUTION LINES
JUN 93
- 13.- EATON J. R.
ELECTRICAL POWER SYSTEMS TRANSMISSION
PRENTICE HALL
- 14.- EDWIN M ANDERSON
ELECTRIC TRANSMISSION LINE FUNDAMENTALS
PRENTICE HALL
- 15.- ELGERD
ELECTRIC ENERGY SYSTEMS THEORY
MC GRAW HILL
- 16.- ELECTROMAGNETIC TRANSIENT PROGRAM REFERENCE MANUAL 1986
- 17.- EPRI ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, TRANSMISSION LINE
REFERENCE BOOK 345 kV AND ABOVE 2ND EDITION
- 18.- ESPECIFICACION DE COORDINACION DE AISLAMIENTO DE CFE
CFEL0000-06
- 19.- ESPECIFICACION DE COORDINACION DE AISLAMIENTO IEC-71-1 E IEC-
71-2
- 20.- ESPECIFICACION DE COORDINACION DE AISLAMIENTO NMX-150-1-
ANCE
- 21.- FALLAS EN LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION POR LA
OPERACION DE LOS APARTARRAYOS IIE 91
- 22.- GRAINGER AND STEVENSON
POWER SYSTEM ANALYSIS
MC GRAW HILL
- 23.- GUIA DE ESPECIFICACION DE COORDINACION DE AISLAMIENTO CFE
L0000-41
- 24.- HERMOSILLO WORLEY VICTOR DR.
SOBRETENSIONES Y ESFUERZOS ELECTRICOS EN LOS SISTEMAS
ELECTRICOS DE POTENCIA
- 25.- HOW DOES A METAL-OXIDE ARRESTER WORK OHIO BRASS

147

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

26.- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, PUBLICATION IEC 71-2 INSULATION COORDINATION PART II APPLICATION GUIDE, GENEVE, SWITZERLAND.

27.- J ELOVAARA, K FOREMAN, A SCHEI AND O. VOLCKER
TEMPORARY OVERVOLTAGES AND THEIR STRESSES ON METAL OXIDE SURGE ARRESTERS
CIGRE

28.- J J WOODWORTH AND E FLETCHER
DEVELOPMENT OF A NEW SURGE ARRESTER TECHNOLOGY NOV 91

29.- L V BEWLEY
TRAVELING WAVES ON TRANSMISSION SYSTEMS
JOHN WILEY

30.- N MENEMELIS, M ENE J BELANGER, G SYBILLE AND L SNIDER
STRESSES IN METAL-OXIDE SURGE- ARRESTERS DUE TO TEMPORARY HARMONIC OVERVOLTAGES
CIGRE

31.- MANUAL DE PRACTICAS EMTP PRIMER

32.- MODELING OF METAL OXIDE SURGE ARRESTERS
TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY VOL 7 NO. 1

33.- O NIGOL
METHODS FOR ANALYZING THE PERFORMANCE OF GAPLESS METAL OXIDE SURGE ARRESTERS JUL 92

34.- PRITINDRA CHOWDHURI
ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS
JOHN WILEY

35.- RANDALL A STANSBERRY
PROTEING DISTRIBUTION CIRCUITS: OVERHEZD SAHIELD WIRE VERSUS LIGNINGSURGE ARRESTERS ABR 91

36.- RSHAW
APARTARRAYOS CON VARISTORES DE OXIDO METALICO, CONCEPTOS DE APLICACIÓN, CIGRE.

37.- SANCHEZ SOTO FIDEL, VILA VIVALDO RAMON ISIDRO

148

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

SIGNIFICADO Y APLICACION DE LAS CARACTERISTICAS EMPLEADAS EN EL
PROCESO DE SELECCION DE APARTARRAYOS DE OXIDO DE ZINC.

PONENCIA IEEE JUL 93

38.- SLAMECKA

INTERRUPTION OF INDUCTIVE CURRENTS CIGRE WORKING GROUP 13.02

ELECTRA No 72

1974

39.- SWITCHING OVERVOLTAGES IN EHV AND UHV SYSTEMS

ELECTRA No. 30

40.- TECNICAS DE PRUEBAS DE ALTO VOLTAJE IEC-60-1 E IEC-60-2

41.- T J REED, J S BARNICK AND W H SMITH

NUEVAS TECNICAS EN LAS MEDICIONES DE TRANSITORIOS DE ALTO
VOLTAJE

81

42.- TRANSIENT LIGHTNING OVERVOLTAGE PROTECTION REQUIREMENTS
FOR A 500 KV GAS-INSULATED SUBSTATION

ENE 78

43.- WEEDY

ELECTRIC POWER SYSTEMS

JOHN WILEY

44. WORKING GROUP 06 OF STUDY COMMITTEE 33

METAL OXIDE SURGE ARRESTERS IN AC SYSTEMS

CIGRE.

45.- ZINK OXIDE ARRESTERS: PRINCIPLE, PROTECTION
CHARACTERISTICS, TEST AND EXPERIENCE

INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRICAL
SYSTEMS PARIS

1989

46.- ZINK OXIDE ARRESTERS: SELECTION OF SURGE CHARACTERISTICS
FROM THE STANDARS, WORKING GROUPE 06 CIGRE.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PAGINACION DISCONTINUA

ANEXO 1.- EJEMPLO DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

DESARROLLAR LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO Y DETERMINAR LAS TENSIONES DE AGUANTE NOMINALES DE LA ZONA DE MEDIA TENSIÓN 24 KV. DE UNA SUBESTACIÓN DE DISTRIBUCIÓN UBICADA A UNA ALTITUD DE 2300 METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR, CONSIDERANDO UN LUGAR CON UN ALTO ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN.

La norma de coordinación de aislamiento IEC-71-2 desarrollada en 1990 y revisada en 1992, especifica un diagrama de flujo para la determinación de las tensiones de aguante nominales de los equipos, iniciando con un análisis del sistema considerando las sobretensiones representativas de corta duración a frecuencia del sistema, de frente lento y de frente rápido que pueden presentarse; continuando con la selección de las distancias en aire para los aislamientos de fase a tierra y de fase a fase tanto internos como externos, así como el criterio de comportamiento de los elementos de protección utilizados para el equipo y los parámetros del sistema, como el tipo de postes, la relación de salidas de línea aérea por kilometro instalado por año, el índice de fallas aceptable, la distancia entre postes y las distancias entre el elemento de protección y los aislamientos interno y externo a proteger; con estos elementos se determinan las tensiones de aguante de coordinación y se introducen factores de seguridad para considerar:

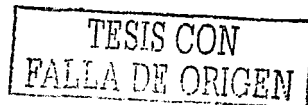
- a) El envejecimiento de los equipos debido a esfuerzos mecánicos, químicos, eléctricos y térmicos.
- b) Las divergencias en el ensamble y producción respecto a las pruebas prototipo realizadas en los equipos.
- c) Las imprecisiones en las tensiones de aguante debido a la divergencia de los arreglos de los equipos, cuando se prueban en laboratorios respecto a las condiciones reales, sobretodo en los aislamientos externos; también se introducen factores de corrección atmosférica por altitud de la instalación y condiciones ambientales del equipo, con ayuda de estos factores se convierten las tensiones de aguante de coordinación a las tensiones de aguante requeridas para las condiciones de prueba normalizadas.

Finalmente se aplican factores de equivalencia para convertir las tensiones requeridas a las tensiones de aguante normalizadas y efectuar la selección adecuada de la tabla de niveles de aislamiento normalizados por IEC 71-2 tabla 1 de tensión de aguante normalizadas para equipos de categoría I.

MÉTODO ESTADÍSTICO PARA DETERMINACIÓN DE LAS TENSIONES DE AGUANTE DE LA ZONA DE 24 KV DE LA SUBESTACIÓN,

1.- SOBRETENSIONES REPRESENTATIVAS:

- a) TEMPORALES



TENSION NOMINAL DEL SISTEMA (KV)	TENSION MAXIMA DE DISEÑO DEL EQUIPO (KV)	TENSION DE AGUANTE NOMINAL A 60 Hz FASE-TIERRA (KV)	TENSION DE AGUANTE NOMINAL DE IMPULSO POR RAYO FASE-TIERRA (KV) CRESTA
4.4	5.5	10	45 60 75
4.8	7.2	10	45 60
13.8	15.5	15	75 90 110
23	27	30	95 125 150
24.3	30	30	110 130 160
48	42	45	200
69	72.5	140	125
115.145	127	(135) 130	150 155
174	141	(145) 130 135	(130) 135 150
150.141	170	(170) 155 135	(150) 150 150
230	245	(235) (185) 140 155 160	(150) (150) 150 150 150

Tabla 1 Tensiones de aguante normalizadas para equipo de categoría 1

FASE a TIERRA: En subestaciones con neutro aterrizado directamente es frecuente encontrar valores de sobretensión temporal a 60 cps de hasta la tensión mas alta del sistema, es decir para nuestro caso 24 kV.

FASE a FASE: Se originan por rechazo de carga, principalmente por transformadores con grandes cargas conectados en el sistema; se considera de 1.2 veces la tensión más alta del sistema:

$$24 \times 1.2 = 28.8 \text{ kV}$$

b) DE FRENTE LENTO

Se presentan por maniobras durante su energización o reenergización, para el caso de análisis consideramos que el recierre es trifasico, sin empleo de resistencias de preinsercion en los interruptores, la red es inductiva y no se aplica compensación paralelo, por lo que el valor correspondiente al 2% de V_{t2} es de 3.66, según el diagrama de factores de sobretensión de frente lento por cierre y recierre de líneas de transmisión obtenida de resultados y experiencias de campo fig. A.1.

Para la obtención del valor 2% de la tensión de fase a fase empleamos la gráfica A.2 complementaria del diagrama, que nos relaciona los valores V_{f2}/V_{t2} vs V_{t2} y que corresponde a un valor de 1.4, es decir $V_{f2}/V_{t2} = 1.4 \text{ pu}$, por lo que:

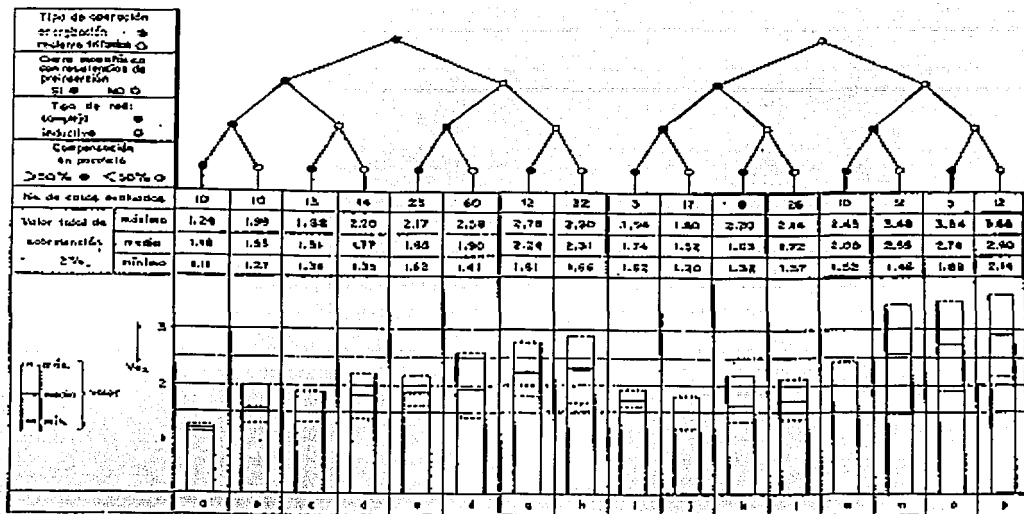


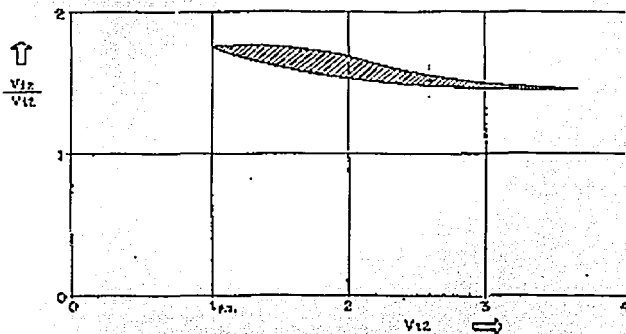
Fig. A.1 Gama de tensiones de frente lento con valor de 2% debido a energización y reenergización de líneas.

$$Vf2 = Vt2 * Vf2 / Vt2 = 3.66 * 1.4 = 5.12 \text{ pu}$$

Los valores de cresta correspondientes serán:

$$\text{Fase a tierra: } 24 * \sqrt{2} / \sqrt{3} * 3.66 = 71.72 \text{ kV}$$

$$\text{Fase a fase: } 24 * \sqrt{2} / \sqrt{3} * 5.12 = 100.33 \text{ kV}$$



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. A.2 Relación valores 2% de sobretensiones de frente lento fase-fase y fase-tierra

c) FRENTE RAPIDO

Tienen la forma del impulso por rayo normalizado de $1.2/50 \mu s$ y una amplitud que corresponde al índice de comportamiento referido al año, depende de la incidencia de descargas atmosféricas en la región, la construcción de la línea y la configuración de la subestación.

Los parámetros de esfuerzo se examinan como se describe en la tensión de aguante de coordinación correspondiente:

2.- TENSION DE AGUANTE DE COORDINACION

a) TEMPORALES

Son iguales a las representativas correspondientes y se aplican a aislamientos internos y externos:

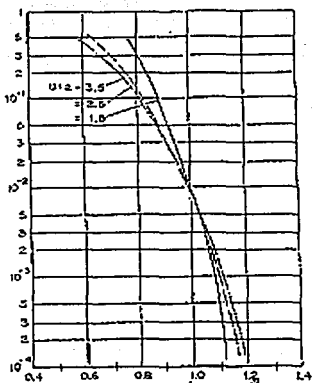
$$Vacf-t = 24 \text{ kV}$$

$$Vacf-f = 28.8 \text{ kV}$$

b) DE FRENTE LENTO

Se determinan en base al factor de coordinación estadístico (Kcs) que relaciona la tensión de aguante de coordinación estadística y la sobretensión de aguante de 2%, fig. A.3.

$$Kcs = Vac/2\%$$



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. A.3 Riesgo de falla de aislamiento para sobretensiones de frente lento vs Kcs .

Donde Kcs se determina de la curva de riesgo de falla mostrada en la fig. A.3, considerando el método fase pico; el riesgo de la falla se determina con la siguiente relación:

$$R = (Ra \times \text{No. Reenergizaciones/año/línea}) / (n \times \text{NO. aislamientos en paralelo})$$

Ra: índice de comportamiento deseado por año=1/250 año.

n: número de líneas conectadas en la subestación=1.

No.: operaciones de reenergización=2.

NO: aislamientos en paralelo=3(boquilla transformador, cortacircuitos y apartarrayo).

FASE A TIERRA

Ra = 1/250 año

n = 1

No = 2

NO = 3

$$R = (1/250 \times 2) / (1 \times 3) = .00267$$

El factor de coordinación estadístico para falla de línea a tierra se determina de la gráfica de riesgo de falla de aislamiento fig. A3, y su valor correspondiente es de Kcs=1.07, por lo que para este caso la tensión de aguante de coordinación será:

$$Vac = Kcs \times V2\% = 1.07 \times 71.72 = 76.74 \text{ kV.}$$

FASE A FASE

Ra=1/250 año

n=3

No.=2

NO=9

$$R = ((1/250) \times 2) / (3 \times 9) = 0.000296$$

El factor de coordinación estadístico para falla de fase a fase también se determina de la gráfica de riesgo de falla de aislamiento fig. A3, y su valor correspondiente es de Kcs=1.06, por lo que para este caso la tensión de aguante de coordinación será:

$$Vac = Kcs \times V2\% = 1.06 \times 100.33 = 106.35 \text{ kV}$$

Estos valores se aplican tanto a aislamientos internos y externos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

c) DE FRENTE RAPIDO

Se aplica el método estadístico simplificado con los siguientes parámetros:

VNP: nivel de protección de impulso por rayo del apartarrayos.

Se utilizan apartarrayos de óxido de metal clase distribución con 80.4 kV

n: número de líneas conectadas a la subestación=3

A: factor que considera el tipo de poste de concreto con cruceta aterrizada tabla 2, A = 900

L: distancia de separación entre el dispositivo de protección y el aislamiento interno =.0025 Km, externo =.0020 Km.

Lsp: distancia entre postes =.04 Km.

Ra: índice de comportamiento deseado =1/250 año

r1: índice de salidas de la línea/año/Km = 4081/3723 = 1.096

$$L1g = Ra/r1 = (1/250)/1.096 = 0.00365$$

La tensión de aguante de coordinación para este caso se obtiene de:

$$Vac = Vnp + (A/n)(L/(Lsp+L1g))$$

El voltaje de aguante de coordinación interno será:

$$Vacint = 80.4 + 900/3 \times 0.0025/(0.04 + 0.00365) = 97.58 \text{ kV.}$$

el voltaje de aguante de coordinación externo:

$$Vacext = 80.4 + (900/3) (0.002/(.04+.00365)) = 94.15 \text{ kV.}$$

3.- TENSIONES DE AGUANTE REQUERIDAS

Para determinarlas se aplican los factores de seguridad, altitud y de contaminación para aislamientos externos.

Factor de corrección atmosférica Ka considerando la altitud de 2300 msnm:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Factores de seguridad ks

Aislamiento interno=1.15

Aislamiento externo=1.05

Factor de contaminación kc, aplicable a aislamientos externos, afecta a la tensión de coordinación a la frecuencia del sistema; considera que el ambiente es altamente contaminado y los aisladores deben por lo tanto seleccionarse con una distancia de fuga mínima nominal de 25mm/kV, según lo indica IEC.

$$kc = \sqrt{\frac{bo}{b}} = \sqrt{1.326} = 1.15$$

a) TEMPORALES

FASE A TIERRA

$$\text{Varint} = ks * \text{Vac} = 1.15 * 24 = \mathbf{27.6 \text{ kV}}$$

$$\text{Varext} = ka * ks * kc * \text{Vac} = 1.326 * 1.05 * 1.15 * 24 = \mathbf{38.43 \text{ kV}}$$

FASE A FASE

$$\text{Varint} = ks * \text{Vac} = 1.15 * 28.8 = \mathbf{33.12 \text{ kV}}$$

$$\text{Vaext} = ka * ks * kc * \text{Vac} = 1.326 * 1.05 * 1.15 * 28.8 = \mathbf{46.1 \text{ kV}}$$

b) FRENTE LENTO

FASE A TIERRA

$$\text{Varint} = 1.15 * 76.74 = \mathbf{88.2 \text{ kV}}$$

$$\text{Varext} = 1.326 * 1.05 * 1.15 * 76.74 = \mathbf{106.85 \text{ kV}}$$

FASE A FASE

$$\text{Varint} = 1.15 * 106.35 = \mathbf{122.3 \text{ kV}}$$

$$\text{Varext} = 1.326 * 1.05 * 106.35 = \mathbf{148.07 \text{ kV}}$$

c) FRENTE RAPIDO

FASE A TIERRA Y FASE A FASE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$\text{Varint} = 1.15 * 97.58 = \mathbf{112.22 \text{ kV}}$$

$$\text{Varext} = 1,326 * 1.05 * 94.15 = \mathbf{131.08 \text{ kV}}$$

4) TENSIONES DE AGUANTE NORMALIZADAS

Para seleccionar las tensiones de aguante normalizadas de la tabla 1, las tensiones de aguante requeridas deben convertirse a esos valores empleando factores de conversión.

a) TEMPORALES

No tienen equivalencia por estar a la frecuencia del sistema.

FASE-TIERRA

$$\text{Varint} = 27.6 \text{ kV.}$$

$$\text{Varext} = 38.43 \text{ kV.}$$

FASE-FASE

$$\text{Varint} = 33.12 \text{ kV.}$$

$$\text{Varext} = 46.11 \text{ kV.}$$

b) DE FRENTE LENTO

Deben estar cubiertas por la tensión de corta duración a frecuencia del sistema o por la de impulso por rayo.

Para las equivalencias a la forma de onda de frecuencia del sistema se considera que el aislamiento interno es líquido, por lo que el factor de equivalencia es de .5 de acuerdo a la tabla No. 4.

$$\text{FASE A TIERRA} \quad \mathbf{88.2 * .5 = 44.1 \text{ kV}}$$

$$\text{FASE A FASE} \quad \mathbf{122.3 * .5 = 61.15 \text{ kV}}$$

Para aislamiento externo los claros son en aire y los aisladores húmedos factor = .6

$$\text{FASE A TIERRA:} \quad \mathbf{106.85 * 0.6 = 64.1 \text{ kV.}}$$

$$\text{FASE A FASE} \quad \mathbf{148.07 * 0.6 = 88.84 \text{ kV.}}$$

